



TUGAS AKHIR - TE 141599

**ALIRAN DAYA OPTIMAL MEMPERTIMBANGKAN KESTABILAN
TEGANGAN DAN PENGGUNAAN *STATIC VAR
COMPENSATOR (SVC)* MENGGUNAKAN METODE
*SEQUENTIAL QUADRATIC PROGRAMMING***

M. Sulaiman
NRP 2211100119

Dosen Pembimbing
Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
Ir. Sjamsjul Anam, MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



FINAL PROJECT - TE 141599

**OPTIMAL POWER FLOW CONSIDERING VOLTAGE
STABILITY AND STATIC VAR COMPENSATOR (SVC) USING
SEQUENTIAL QUADRATIC PROGRAMMING METHOD**

M. Sulaiman
NRP 2211100119

Advisor
Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
Ir. Sjamsjul Anam, MT.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industry Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2015

**ALIRAN DAYA OPTIMAL MEMPERTIMBANGKAN
KESTABILAN TEGANGAN DAN PENGGUNAAN *STATIC
VAR COMPENSATOR (SVC)* MENGGUNAKAN METODE
*SEQUENTIAL QUADRATIC PROGRAMMING***

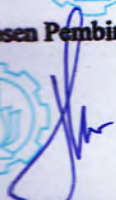
TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I



Dr. Rany Selo Wibowo, ST., MT.
NIP. 1974 11 29 2000 12 1001

Dosen Pembimbing II



Ir. Sjamsjul Anam, MT.
NIP. 1963 07 25 1990 03 1002



Aliran Daya Optimal Mempertimbangkan Kestabilan Tegangan dan Penggunaan *Static Var Compensator (SVC)* Menggunakan Metode *Sequential Quadratic Programming*

M. Sulaiman
2211 100 119

Dosen Pembimbing I : Dr. Rony Seto Wibowo ST., MT.
Dosen Pembimbing II : Ir. Sjamsjul Anam, MT.

ABSTRAK

Pada tugas akhir ini, meneliti tentang aliran daya optimal yang mempertimbangkan kestabilan Tegangan dan juga penggunaan *static var compensator (SVC)*. Metode optimasi yang digunakan pada tugas akhir ini adalah metode *sequential quadratic programming*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari penggunaan SVC terhadap biaya optimum pembangkitan dan juga *load margin* () maksimum sistem. *Load margin* () adalah suatu ukuran atau jarak fundamental terhadap *voltage collapse*. SVC ditempatkan di beberapa bus yang sudah dipilih dengan kapasitas yang sudah ditentukan. Kemudian dilakukan simulasi aliran daya optimal untuk mendapatkan total biaya pembangkitan optimum dengan dan tanpa SVC. Simulasi perhitungan aliran daya optimal dengan dan tanpa SVC pada tugas akhir ini dilakukan pada dua kondisi sekaligus yaitu saat *operating point* dan saat *collapse point*. Beban saat *collapse point* lebih besar (1+) kali beban saat *operating point*. Sehingga akan terlihat pengaruh SVC terhadap *load margin* sistem. Penggunaan SVC dapat menurunkan biaya pembangkitan sistem dan juga meningkatkan kestabilan tegangan sistem dibuktikan dengan meningkatnya *load margin* sistem.

Kata kunci: Aliran Daya Optimum, Kestabilan Tegangan, *Static Var Compensator*, *Sequential Quadratic Programming*.

Aliran Daya Optimal Mempertimbangkan Kestabilan Tegangan dan Penggunaan *Static Var Compensator (SVC)* Menggunakan Metode *Sequential Quadratic Programming*


M. Sulaiman
2211 100 119

Dosen Pembimbing I : Dr. Rony Seto Wibowo ST., MT.
Dosen Pembimbing II : Ir. Sjamsjul Anam, MT.

ABSTRAK

Pada tugas akhir ini, meneliti tentang aliran daya optimal yang mempertimbangkan kestabilan Tegangan dan juga penggunaan *static var compensator (SVC)*. Metode optimasi yang digunakan pada tugas akhir ini adalah metode *sequential quadratic programming*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari penggunaan SVC terhadap biaya optimum pembangkitan dan juga *load margin* (λ) maksimum sistem. *Load margin* (λ) adalah suatu ukuran atau jarak fundamental terhadap *voltage collapse*. SVC ditempatkan di beberapa bus yang sudah dipilih dengan kapasitas yang sudah ditentukan. Kemudian dilakukan simulasi aliran daya optimal untuk mendapatkan total biaya pembangkitan optimum dengan dan tanpa SVC. Simulasi perhitungan aliran daya optimal dengan dan tanpa SVC pada tugas akhir ini dilakukan pada dua kondisi sekaligus yaitu saat *operating point* dan saat *collapse point*. Beban saat *collapse point* lebih besar $(1+\lambda)$ kali beban saat *operating point*. Sehingga akan terlihat pengaruh SVC terhadap *load margin* sistem. Penggunaan SVC dapat menurunkan biaya pembangkitan sistem dan juga meningkatkan kestabilan tegangan sistem dibuktikan dengan meningkatnya *load margin* sistem.

Kata kunci: Aliran Daya Optimum, Kestabilan Tegangan, *Static Var Compensator*, *Sequential Quadratic Programming*.



Halaman ini sengaja dikosongkan

Optimal Power Flow Considering Voltage Stability and Static Var Compensator (SVC) Using Sequential Quadratic Programming Method

M. Sulaiman
2211 100 119

Supervisor I : Dr. Rony Seto Wibowo ST., MT.
Supervisor II : Ir. Sjamsjul Anam, MT.

ABSTRACT

In this final project, examines the optimal power flow considering Voltage Stability and static var compensator (SVC). Optimization methods that used in this thesis is sequential quadratic programming method. This study aims to determine the effect of the SVC to the cost of generation and Maximum of load margin (λ) system. Load margin (λ) is a fundamental measure of proximity to voltage collapse[6]. SVC placed in several buses that have been selected with a predetermined capacity. Then calculate the optimal power flow with matpower to obtain optimum total generation cost with and without SVC. Simulation of optimal power flow with and without SVC in this final project performed on two conditions, the operating point and the collapse point. The load of collapse point is greater $(1 + \lambda)$ times then the load of operating point. So it will be seen the influence of SVC on load margin system. The use of SVC can reduce the cost of generating the system and also increasing the system voltage stability margin by the increasing load margin system.

Keywords: *Optimal Power Flow, Voltage Stability, Static Var Compensator, Sequential Quadratic Programming.*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Penulis dengan segala kerendahan hati melantunkan puji syukur Alhamdulillah atas kehadiran Allah SWT yang telah mencurahkan hidayah dan karunia-Nya, sehingga penyusunan laporan tugas akhir yang berjudul **“Aliran Daya Optimal Mempertimbangkan Kestabilan Tegangan dan Penggunaan *Static Var Compensator (SVC)* Menggunakan Metode *Sequential Quadratic Programming*”** dapat diselesaikan dengan baik dan lebih cepat. Laporan ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar sarjana Jurusan Teknik Elektro ITS.

Pada kesempatan yang penuh kebanggaan dan kebahagiaan ini, penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Bapak, ibu, dan adik-adik tercinta yang selalu memberikan doa dan semangat yang tak terbatas dan tak ternilai harganya.
2. Bapak Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT dan Bapak Ir. Sjamsjul Anam, MT selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu berharga demi memberikan bimbingan dan saran yang sangat membantu dan bermanfaat.
3. Seluruh dosen Jurusan Teknik Elektro yang telah banyak memberikan ilmu dan menginspirasi penulis.
4. Mas Faiz, Wisam J. N., Nani, dan Burhan yang telah bekerja sama dan membantu penulis.
6. Seluruh asisten Laboratorium Analisis Sistem Tenaga.
7. Rekan-rekan di Jurusan Teknik Elektro yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Akhir kata “Tiada Gading yang Tak Retak”. Oleh karena itu, kritik dan saran yang bersifat konstruktif sangat diharapkan. Semoga laporan tugas akhir ini dapat memberikan manfaat, membuka wawasan mengenai studi aliran daya optimal, dan mendorong penciptaan teknologi baru.

Surabaya, Juni 2015

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

Lembar Judul	
Lembar Pernyataan	
Lembar Pengesahan	
Abstrak.....	i
Abstract.....	iii
Kata Pengantar	v
Daftar Isi	vii
Daftar Gambar	ix
Daftar Tabel.....	xiii

BAB I PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 PERUMUSAN MASALAH	2
1.3 TUJUAN DAN MANFAAT	2
1.4 BATASAN MASALAH	3
1.5 METODE PENELITIAN	3
1.5.1 Studi Literatur	3
1.5.2 Pengumpulan Data	4
1.5.3 Pembuatan program dalam MATLAB dengan aplikasi software Matpower serta penerapan sequential quadratic programming pada optimal power flow.....	4
1.5.4 Simulasi Dan Analisis	4
1.5.5 Penulisan Buku.....	4
1.6 SISTEMATIKA PENULISAN.....	4
1.6.1 BAB 1: Pendahuluan.....	4
1.6.2 BAB 2: Aliran Daya Optimal Mempertimbangkan Kestabilan Tegangan Dan SVC	4
1.6.3 BAB 3: Penerapan Sequential Quadratic Programming pada Aliran Daya Optimal	5
1.6.4 BAB 4: Simulasi dan Analisis	5
1.6.5 BAB 5: Penutup	5
1.7 RELEVANSI	5

BAB II ALIRAN DAYA OPTIMAL MEMPERTIMBANGKAN KESTABILAN TEGANGAN DAN SVC

2.1 SISTEM TENAGA LISTRIK	7
2.1.1 Tujuan Operasi Sistem Tenaga Listrik	9

2.2	ALIRAN DAYA LISTRIK	10
2.3	PERSAMAAN ALIRAN DAYA.....	11
2.4	ALIRAN DAYA OPTIMAL ATAU OPTIMAL POWER FLOW (OPF)...	14
2.4.1	Pengertian Optimal Power Flow ^[3]	14
2.4.2	Persamaan Matematis OPF	16
2.5	STATIC VAR COMPENSATOR (SVC).....	17
2.5.1	Fungsi Static Var Compensator	19
2.5.2	Cara Kerja SVC	20
2.6	STABILITAS SISTEM TENAGA	21
2.7	KESTABILAN TEGANGAN	22
2.7.1	Kriteria kestabilan tegangan.....	23
2.7.2	Mekanisme Ketidakstabilan Tegangan	23
2.8	OPTIMISASI SEQUENTIAL QUADRATIC PROGRAMMING (SQP) ^[7] ..	24
2.9	MATPOWER ^[8]	25
2.9.1	OPF di dalam Matpower	26

BAB III PENERAPAN SEQUENTIAL QUADRATIC PROGRAMMING PADA ALIRAN DAYA OPTIMAL

3.1	ALGORITMA	29
3.2	SEQUENTIAL QUADRATIC PROGRAMING (FMINCON).....	30
3.2.1	Sintaksis Sequential Quadratic Programming (fmincon) ...	30
3.2.2	Input Argumen dari Sequential Quadratic Programming (fmincon).....	31
3.2.3	Sequential Quadratic Programming pada OPF	32
3.2.3.1	Inisialisasi Permasalahan OPF	32
3.2.3.2	Inisialisasi x_0 Sebagai Nilai Awal	33
3.2.3.3	Pembentukan fungsi objektif F dan DF	35
3.2.3.4	Pembentukan Equality Constraint Berupa Matrik g dan juga dg	36
3.2.3.5	Pembentukan Inequality Constraint berupa matrik h dan dh	38
3.2.3.6	Pembentukan Vektor lb dan ub yang Menyatakan Batas Atas dan Bawah dari Variabel yang dioptimasi.....	40

BAB IV SIMULASI DAN ANALISIS

4.1	SISTEM IEEE 14 BUS	43
4.1.1	Pengujian Tahap 1 Sistem IEEE 14 bus.....	44
4.1.1.1	Analisa Pengujian Tahap 1 Sistem IEEE 14 bus	44
4.1.2	Pengujian Tahap 2 Sistem IEEE 14 bus.....	46

4.1.2.1	Analisis Pengujian Tahap 2 Sistem IEEE 14 bus	47
4.2	SISTEM IEEE 30 BUS.....	49
4.2.1	Pengujian Tahap 1 Sistem IEEE 30 bus	49
4.2.1.1	Analisa Pengujian Tahap 1 Sistem IEEE 30 bus.....	50
4.2.2	Pengujian Tahap 2 Sistem IEEE 30 bus	52
4.2.2.1	Analisis Pengujian Tahap 2 Sistem IEEE 30 bus	53
4.3	SISTEM JAWABALI	55
4.3.1	Pengujian Tahap 1 Sistem 25 Bus Jawabali	55
4.3.1.1	Analisa Pengujian Tahap 1 Sistem Jawabali	56
4.3.2	Pengujian Tahap 2 Sistem 25 Bus Jawabali	58
4.3.2.1	Analisis Pengujian Tahap 2 Sistem Jawabali	60
 BAB V PENUTUP		
5.1	KESIMPULAN	63
5.2	SARAN.....	63
Daftar Pustaka.....		65
Lampiran.....		67
Biografi Penulis		

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Besaran yang diketahui dan dihitung pada bus	11
Tabel 4.1	Penempatan <i>SVC</i> pada Sistem IEEE 14 bus.....	44
Tabel 4.2	Data hasil simulasi pengujian tahap 1 pada Sistem IEEE 14 bus	44
Tabel 4.3	Data hasil pengujian tahap 2 Sistem IEEE 14 bus	46
Tabel 4.4	Data hasil pengujian tahap 2 Sistem IEEE 14 bus (Lanjutan)	47
Tabel 4.5	Penempatan <i>SVC</i> di Sistem IEEE 30 bus	50
Tabel 4.6	Data hasil simulasi pengujian tahap 1 pada Sistem IEEE 30 bus	50
Tabel 4.7	Penempatan <i>SVC</i> di Sistem IEEE 30 bus	52
Tabel 4.8	Data hasil pengujian tahap 2 Sistem IEEE 30 bus	52
Tabel 4.9	Data hasil pengujian tahap 2 Sistem IEEE 30 bus (Lanjutan).....	53
Tabel 4.10	Penempatan <i>SVC</i> pada sistem Jawabali	56
Tabel 4.11	Data hasil simulasi pengujian tahap 1 Sistem Jawabali	56
Tabel 4.12	Penempatan <i>SVC</i> pada Sistem 25 bus Jawabali	58
Tabel 4.13	Data hasil pengujian Sistem 25 bus Jawabali tahap 2	59
Tabel 4.14	Biaya pebangkitan Jawabali saat <i>load margin</i> = 0,4	60

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Diagram satu garis sistem tenaga listrik	7
Gambar 2.2	Sistem Tenaga Listrik Terinterkoneksi	8
Gambar 2.3	Tujuan operasi sistem tenaga listrik	10
Gambar 2.4	Penggambaran Bus secara Umum	13
Gambar 2.5	<i>One-line</i> Diagram dari konfigurasi <i>SVC</i>	18
Gambar 2.6	<i>SVC</i> di Gardu Induk	19
Gambar 2.7	karakteristik <i>SVC</i> [4]	21
Gambar 2.8	kurva P-V	23
Gambar 4.1	Pengaruh <i>SVC</i> terhadap λ pada Sistem IEEE 14 bus	45
Gambar 4.2	Pengaruh <i>SVC</i> Pada Biaya pada Sistem IEEE 14 dengan $\lambda_{\max}=0,8$	48
Gambar 4.3	Pengaruh <i>SVC</i> terhadap P & Q generator pada Sistem IEEE 14 bus	49
Gambar 4.4	Pengaruh <i>SVC</i> terhadap λ pada Sistem IEEE 30 Bus	50
Gambar 4.5	Pengaruh <i>SVC</i> pada biaya pembangkitan Sistem IEEE 30 bus dengan $\lambda = 0,3$	54
Gambar 4.6	Pengaruh <i>SVC</i> pada P dan Q generator pada Sistem IEEE 30 bus	55
Gambar 4.7	Pengaruh <i>SVC</i> terhadap <i>load margin</i> pada Sistem Jawabali	57
Gambar 4.8	Pengaruh <i>SVC</i> terhadap biaya pembangkitan Pada sistem Jawabali	60
Gambar 4.9	Pengaruh <i>SVC</i> terhadap penghematan Total biaya pembangkitan	61
Gambar 4.10	Pengaruh <i>SVC</i> terhadap P dan Q generator pada Sistem Jawabali	62

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Saat ini energi listrik telah menjadi suatu kebutuhan utama bagi manusia, seperti kebutuhan utama yang lain. Masyarakat modern tidak dapat melakukan aktivitas dengan baik tanpa tenaga listrik. Hampir semua aktivitas manusia membutuhkan tenaga listrik. Kebutuhan akan tenaga listrik selalu bertambah dari waktu ke waktu. Untuk tetap dapat melayani kebutuhan tenaga listrik, maka pembangkitan tenaga listrik haruslah dikembangkan seirama dengan kenaikan kebutuhan akan tenaga listrik. Permintaan tenaga listrik yang terus bertambah menyebabkan tenaga listrik yang harus disuplai oleh pembangkit menjadi sangat besar. Banyak sekali hal yang mempengaruhi pembangkitan tenaga listrik, salah satu yang paling utama adalah penggunaan bahan bakar. Selain itu, peningkatan kebutuhan tenaga listrik harus diimbangi dengan pengelolaan sumber pembangkit yang baik. Sehingga mampu menyediakan tenaga listrik ekonomis dan tetap menjaga kualitas prima meliputi kontinuitas, seimbang, stabil dan kadar harmonik yang rendah[1].

Aliran Daya Optimal atau *Optimal Power Flow* (OPF) merupakan perhitungan untuk meminimalkan suatu fungsi yaitu biaya pembangkitan suatu pembangkit tenaga listrik dan rugi-rugi pada saluran transmisi dengan mengatur pembangkitan daya aktif dan reaktif setiap pembangkit yang terinterkoneksi dengan memperhatikan batas-batas tertentu. Batas yang umum dinyatakan dalam perhitungan analisis aliran daya optimal adalah berupa batas minimum dan maksimum untuk pembangkitan daya aktif pada pembangkit.

Dalam analisis *optimal power flow*, tujuan utama adalah untuk meminimal biaya pembangkitan pada sistem tenaga. Pada *optimal power flow*, saat beban ringan, pembangkit termurah selalu menjadi pilihan pertama. Jika beban naik, pembangkit yang lebih mahal yang kemudian akan dimasukkan. Jadi biaya pembangkitan sangat penting dalam penyelesaian *OPF*. Selain untuk meminimalkan biaya pembangkitan agar harga listrik menjadi murah dan terjangkau, namun juga tidak boleh mengabaikan kestabilan tegangan dan untuk mencapainya dibutuhkan *static var compensator* (SVC). *SVC* sendiri berfungsi sebagai pemelihara kestabilan saat kondisi *steady state* dalam batasan yang sudah ditentukan pada jaringan transmisi berjarak jauh dan berbeban

tinggi *heavily loaded*.

Pada tugas akhir ini, digunakan metode *sequential quadratic programming* untuk menyelesaikan perhitungan *optimal power flow* pada dua kondisi yaitu saat *operating point* dan juga saat *collapse point*. *SVC* ditempatkan di beberapa bus sistem yang sudah ditentukan. Setelah itu dilakukan perhitungan *OPF* untuk mengetahui pengaruh *SVC* terhadap biaya pembangkitan dan juga *load margin* sistem. *Load margin* adalah suatu ukuran fundamental untuk mengetahui jarak atau kedekatan terhadap *voltage collapse*[2].

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan diselesaikan dalam Tugas Akhir ini adalah:

1. Bagaimana membuat program *optimal power flow* yang mempertimbangkan kestabilan tegangan dan juga penggunaan *static var compensator*.
2. Bagaimana menentukan besar daya aktif dan daya reaktif yang harus dibangkitkan oleh setiap pembangkit agar biaya pembangkitan menjadi seminimal mungkin tanpa melanggar batasan-batasan yang sudah ditentukan.
3. Bagaimana pengaruh dari pemasangan *static var compensator* terhadap biaya pembangkitan sistem tenaga listrik.
4. Bagaimana pengaruh dari daya reaktif yang diinjeksikan oleh *static var compensator* pada suatu sistem tenaga listrik terhadap *maximum load margin* sistem.

1.3 Tujuan Dan Manfaat

Tujuan yang ingin dicapai dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Menentukan besar daya aktif dan daya reaktif yang harus dibangkitkan oleh setiap pembangkit secara optimal.
2. Mensimulasikan dan juga menganalisa pengaruh dari penggunaan *static var compensator* terhadap *load margin* dan biaya pembangkitan pada suatu sistem tenaga listrik.
3. Memperoleh biaya pembangkitan yang seminimal mungkin tanpa melanggar batasan yang sudah ditentukan

Manfaat yang diharapkan dari tugas akhir ini adalah :

1. Memberikan solusi untuk meminimalkan total biaya pembangkitan dengan penggunaan *static var compensator*

- dan tetap menjaga batasan tegangan setiap bus dan batasan pembebanan saluran yang telah ditentukan.
2. Mengetahui manfaat dari penggunaan *static var compensator* pada suatu sistem tenaga listrik.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Metode yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan aliran daya optimal atau *optimal power flow* adalah metode *sequential quadratic programming*.
2. *Software* yang digunakan untuk simulasi adalah *MATLAB*.
3. Kapasitas saluran transmisi diperhatikan.
4. *Test systems* menggunakan Sistem IEEE 14 bus, Sistem IEEE 30 bus dan Sistem 25 bus Jawabali yang telah dimodifikasi.
5. Data beban awal ditentukan.
6. Data beban tidak melebihi kapasitas total pembangkitan.
7. *Static var compensator* disimulasikan sebagai generator yang hanya mensuplai daya reaktif.
8. Lokasi dan kapasitas *SVC* sudah ditentukan.
9. Semua biaya menyangkut *SVC* tidak diperhitungkan.

1.5 Metode Penelitian

Pada tugas akhir ini akan dilakukan penelitian tentang perhitungan *optimal power flow* (OPF) yang mempertimbangkan kestabilan tegangan dan penggunaan *static var compensator* (SVC). Oleh karena itu, perhitungan *OPF* akan dihitung dalam dua kondisi yaitu saat *operating point* dan *collapse point*. Dimana beban saat *collapse point* lebih besar dari pada saat *operating point*. Untuk mendapatkan pembangkitan yang optimal dari suatu sistem tenaga listrik akan digunakan metode *sequential quadratic programming* (SQP) sebagai metode perhitungan. Data yang digunakan dalam tugas akhir ini meliputi *cost function*, batasan pembangkitan setiap pembangkit dan kapasitas saluran transmisi. Perhitungan *OPF* akan disimulasikan dengan menggunakan *software MATLAB* dengan aplikasi *software matpower*. Tahapan dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1.5.1 Studi Literatur

Literatur-literatur yang digunakan berasal dari jurnal, prosiding, internet dan *text book*.

1.5.2 Pengumpulan Data

Data yang dibutuhkan berupa *cost function*, pembangkitan maksimum dan minimum, kapasitas saluran dan lain-lain.

1.5.3 Pembuatan program dalam *MATLAB* dengan aplikasi software *Matpower* serta penerapan *sequential quadratic programming* pada *optimal power flow*.

Program yang dibuat akan diuji terlebih dahulu untuk sistem yang kecil untuk kemudian digunakan pada sistem yang besar yaitu Sistem IEEE 14 bus, Sistem IEEE 30 bus dan Sistem 25 bus Jawabali yang telah dimodifikasi.

1.5.4 Simulasi Dan Analisis

Simulasi dilakukan dalam dua kondisi, kondisi pertama *operating point* dan kondisi kedua *collapse point* dengan menambahkan *static var compensator* pada beberapa bus yang sudah ditentukan. Data yang diperoleh dari hasil simulasi tersebut akan dianalisis untuk mengetahui pengaruh *SVC* terhadap *maximum load margin* sistem dan biaya total pembangkitan.

1.5.5 Penulisan Buku

Penulisan laporan dilakukan sebagai penggambaran kesimpulan dari tugas akhir ini. Kesimpulan tersebut merupakan jawaban dari permasalahan yang dianalisa. Selain itu juga akan diberikan saran sebagai masukan berkaitan dengan apa yang telah dilakukan.

1.6 Sistematika Penulisan

Laporan Tugas Akhir ini disusun dalam suatu sistematika sebagai berikut:

1.6.1 BAB 1: Pendahuluan

Bab ini membahas mengenai latar belakang, tujuan penelitian, permasalahan, batasan masalah, metode penelitian, sistematika penulisan dan relevansi dari Tugas Akhir.

1.6.2 BAB 2: Aliran Daya Optimal Mempertimbangkan Kestabilan Tegangan Dan *SVC*

Bab ini berisi tentang dasar teori yang merupakan penjelasan mengenai aliran daya optimal atau *optimal power flow*, kestabilan tegangan, *static var compensator* dan *sequential quadratic programming* serta sistem kelistrikan secara umum.

1.6.3 BAB 3: Penerapan *Sequential Quadratic Programming* pada Aliran Daya Optimal.

Bab ini berisi tentang penjelasan mengenai penerapan *sequential quadratic programming* pada permasalahan aliran daya optimal pada dua kondisi yaitu *operating point* dan *collapse point*.

1.6.4 BAB 4: Simulasi dan Analisis

Bab ini berisi hasil simulasi aliran daya optimal atau *optimal power flow* dengan *sequential quadratic programming* serta analisis perbedaan hasil pembangkitan optimal dengan dan tanpa *static var compensator*.

1.6.5 BAB 5: Penutup

Kesimpulan yang diperoleh dari hasil pembahasan dan saran-saran yang berhubungan dengan pokok-pokok pembahasan.

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Dapat memberikan manfaat terhadap perkembangan sistem tenaga listrik khususnya pada permasalahan yang mengenai aliran daya optimal dan *static var compensator*.
2. Dapat menambah penguasaan ilmu pengetahuan dan teknologi (IPTEK) di bidang optimasi pembangkitan tenaga listrik bagi penulis.
3. Dapat menjadi referensi bagi mahasiswa lain yang akan mengambil Tugas Akhir dengan permasalahan yang serupa.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

ALIRAN DAYA OPTIMAL

MEMPERTIMBANGKAN KESTABILAN

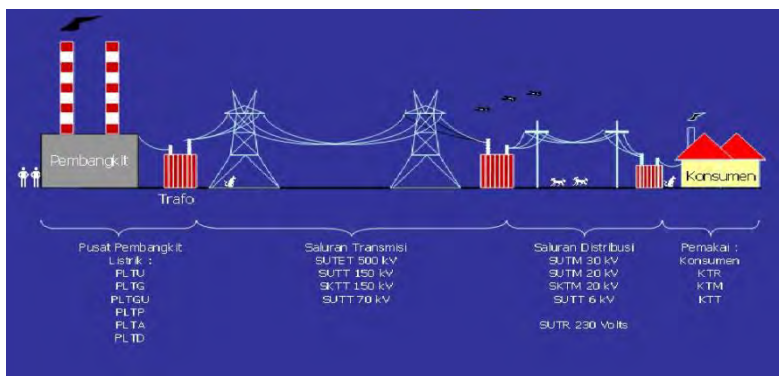
TEGANGAN DAN SVC

2.1 Sistem Tenaga listrik

kebutuhan akan tenaga listrik dari konsumen selalu bertambah dari waktu ke waktu. Untuk tetap dapat melayani kebutuhan tenaga listrik dari konsumen, maka sistem tenaga listrik haruslah dikembangkan seiring dengan kenaikan kebutuhan akan tenaga listrik dari konsumen. Sistem tenaga listrik merupakan sekumpulan pusat listrik dan pusat beban atau gardu induk yang dihubungkan oleh jaringan transmisi sehingga menjadi kesatuan interkoneksi. Secara umum sistem tenaga listrik dibagi menjadi beberapa bagian antara lain:

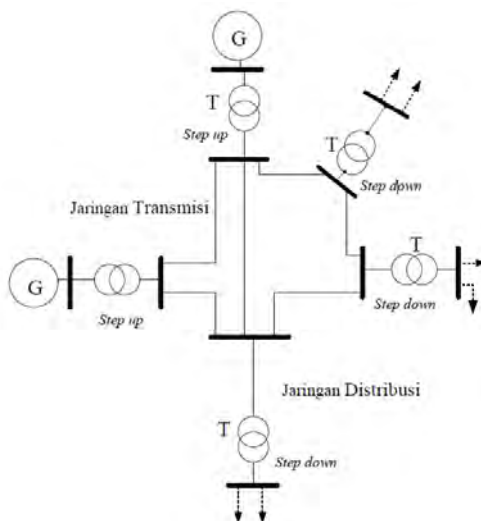
1. pembangkit tenaga listrik
2. penyaluran tenaga listrik
3. distribusi tenaga listrik dan beban.

Sistem tenaga listrik *modern* merupakan sistem yang kompleks yang terdiri dari pusat pembangkit, saluran transmisi dan jaringan distribusi yang berfungsi untuk menyalurkan daya dari pusat pembangkit ke pusat-pusat beban. Untuk memenuhi tujuan operasi sistem tenaga listrik, ketiga bagian yaitu pembangkit, transmisi dan distribusi tersebut satu dengan yang lainnya tidak dapat dipisahkan. Gambar sistem tenaga listrik ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Diagram satu garis sistem tenaga listrik

Pusat pembangkit listrik (*power plant*) yaitu tempat pertamakalinya listrik dibangkitkan, dimana terdapat turbin sebagai penggerak mula (*prime mover*) dan generator yang membangkitkan listrik. Sedangkan transmisi tenaga listrik merupakan proses penyaluran tenaga listrik dari tempat pembangkitan tenaga listrik (*power plant*) hingga saluran distribusi listrik (*substation distribution*) sehingga dapat disalurkan sampai pada konsumen pengguna listrik. Sistem distribusi dapat dikelompokkan dalam dua tingkat yaitu : saluran distribusi primer dan saluran distribusi sekunder. Saluran distribusi primer terletak pada sisi trafo distribusi, yaitu antara titik sekunder trafo substation dengan titik primer trafo distribusi yang berfungsi menyalurkan tenaga listrik bertegangan menengah yaitu 20 kV, sedangkan saluran distribusi sekunder terletak pada sisi sekunder trafo distribusi, yaitu antara titik sekunder dengan titik cabang menuju beban yang berfungsi menyalurkan tenaga listrik bertegangan rendah yaitu 220/380 V. Secara umum beban yang dilayani oleh sistem distribusi listrik dibagi dalam beberapa sektor yaitu sektor perumahan, sektro industri, sektor komersial dan sektor usaha.



Gambar 2.2 Sistem Tenaga Listrik Terinterkoneksi

Biaya pembangkitan tenaga listrik pada umumnya merupakan bagian biaya yang terbesar dari biaya operasi suatu perusahaan listrik. Secara garis besar biaya operasi dari suatu sistem tenaga listrik terdiri dari :

1. Biaya pembangkitan tenaga listrik
2. Biaya operasi
3. Biaya lain-lain

2.1.1 Tujuan Operasi Sistem Tenaga Listrik

Untuk mendapatkan operasi sistem tenaga listrik yang baik maka perlu diperhatikan tiga hal berikut ini, yaitu:

1. Ekonomi (*economy*),
2. Keandalan (*security*),
3. Kualitas (*quality*).

Ekonomi (*economy*) berarti listrik harus dioperasikan secara ekonomis, tetapi dengan tetap memperhatikan keandalan dan kualitasnya.

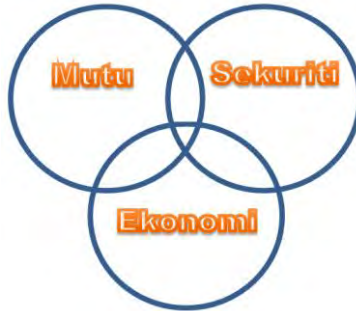
Keandalan (*security*) merupakan tingkat keamanan sistem terhadap kemungkinan terjadinya gangguan. Sedapat mungkin gangguan di pembangkit maupun transmisi dapat diatasi tanpa mengakibatkan pemadaman di sisi konsumen.

Kualitas (*quality*) tenaga listrik yang diukur dengan kualitas tegangan dan frekuensi yang dijaga sedemikian rupa sehingga tetap pada kisaran yang ditetapkan.

Didalam pelaksanaan pengendalian operasi sistem tenaga listrik, urutan prioritas dari sasaran diatas bisa berubah-ubah tergantung pada kondisi *real time*. Pada saat terjadi gangguan, maka keamanan adalah prioritas utama sedangkan mutu dan ekonomi bukanlah hal yang utama. Demikian juga pada saat keamanan dan mutu sudah bagus, maka selanjutnya ekonomi harus diprioritaskan.

Efisiensi produksi tenaga listrik diukur dari tingkat biaya yang digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik. Hal yang paling mudah dalam optimasi biaya produksi tenaga listrik adalah dengan sistem *Merit Order*. *Merit order* ini adalah suatu metode dimana pembangkit dengan biaya yang paling murah akan diprioritaskan untuk beroperasi dibandingkan dengan yang lebih mahal, sampai beban tenaga listrik tercukupi.

Sebagai gambaran dari tujuan operasi sistem tenaga listrik dapat dilihat seperti pada Gambar 2.3. dibawah ini.



Gambar 2.3 Tujuan operasi sistem tenaga listrik

2.2 Aliran Daya Listrik

Analisa aliran daya merupakan studi dasar dalam menganalisa suatu sistem tenaga listrik, baik untuk perencanaan maupun operasi. Pada dasarnya sasaran utama dari semua analisa aliran daya adalah menentukan besar dan sudut fasa tegangan pada setiap bus, dengan diketahuinya tegangan maka daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) dapat dihitung. Jika P dan Q pada dua buah bus diketahui maka aliran daya dengan jelas dapat diketahui, serta rugi-rugi daya saluran penghubung dapat diketahui. Secara umum tujuan analisa aliran daya adalah:

1. Untuk memeriksa tegangan dan sudut fasa masing-masing bus.
2. Untuk memeriksa kemampuan semua peralatan yang ada dalam sistem apakah cukup besar untuk menyalurkan daya yang diinginkan.
3. Untuk memperoleh kondisi awal bagi studi-studi selanjutnya, yakni studi hubung singkat, studi rugi-rugi transmisi dan studi stabilitas.

Ada 3 macam bus, dalam hal ini setiap bus mempunyai empat besaran dengan dua besaran diantaranya diketahui yakni:

1. BUS REFERENSI (*slack bus*). Adalah suatu bus yang selalu mempunyai besaran dan sudut fasa yang tetap dan telah diberikan sebelumnya, pada bus ini berfungsi untuk mencatu rugi-rugi, kekurangan daya yang ada pada jaringan, dalam hal ini penting karena kekurangan daya tidak dapat dicapai kecuali terdapat suatu bus yang mempunyai daya tak terbatas sehingga dapat mengimbangi rugi-rugi.

2. BUS PQ (bus beban). Pada tipe bus ini daya aktif dan daya reaktif diketahui, sedangkan dua lainnya didapat dari hasil perhitungan.
3. BUS PV (bus pembangkit). Pada tipe bus ini, besar tegangan dan daya aktif telah ditentukan. Sedangkan untuk daya reaktif dan sudut fasa tegangan didapat dari hasil perhitungan.

Pada tiap-tiap bus terdapat 4 besaran, yaitu :

1. Daya real atau daya aktif P
2. Daya reaktif Q
3. Harga skalar tegangan $|V|$
4. Sudut fasa tegangan q

Tabel 2.1 Besaran yang diketahui dan dihitung pada bus

Jenis Bus	Besaran	
	Diketahui	Dihitung
<i>Slack/Swing</i>	V, d	P, Q
Beban	P, Q	d, V
Generator	V, P	Q, d

Suatu sistem tenaga listrik bisa terdiri dari ratusan titik (*bus*) dengan harga impedansi tertentu yang dinyatakan dalam satuan per unit dari MVA *base*. Persamaan sistem dapat dirumuskan secara sistematis dalam bentuk yang bermacam-macam. Umumnya, metode titik (*bus*) tegangan yang paling cocok dan sering digunakan dalam berbagai analisis aliran daya. Saat arus titik tersebut ditentukan, maka persamaan tersebut dapat diselesaikan menggunakan nilai tegangan *-bus*-nya.

2.3 Persamaan Aliran Daya

Berdasar hukum Kirchoff Arus, hubungan antara besar tegangan bus dan arus dinyatakan dalam persamaan titik tegangan.

$$I_{bus} = Y_{bus} V_{bus} \quad (2.1)$$

Untuk sistem dengan n bus yang independen kita dapat menulis persamaan diatas sebanyak n persamaan.

$$\begin{aligned} I_1 &= Y_{11}V_{11} + Y_{12}V_2 +, \dots, +Y_{1n}V_n \\ I_2 &= Y_{21}V_{21} + Y_{22}V_2 +, \dots, +Y_{2n}V_n \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$I_n = Y_{n1}V_{n1} + Y_{n2}V_2 + \dots + Y_{nn}V_n$$

Persamaan di atas jika dinyatakan ke dalam bentuk matriks admitansi dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Atau

$$I = [Y][V] \quad (2.4)$$

Dimana

I = vektor arus

V = vektor tegangan

Y = matrik admitansi bus

n = jumlah total titik

Y_{ii} = admitansi sendiri dari titik i

Y_{ij} = mutual admitansi dari titik i dan j

Bila tidak ada line antara titik i dan titik j maka nilai Y_{ij} adalah nol.
Arus bus bisa direpresentasikan oleh:

$$\begin{aligned} I_i &= \frac{S_i}{V_i} = \frac{S_{Gi} - S_{Di}}{V_i} \\ &= \frac{(P_{Gi} - P_{Di}) - j(Q_{Gi} - Q_{Di})}{V_i} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Dimana:

s = vektor daya komplek

P_{Gi} = output daya aktif generator di bus i

P_{Di} = beban aktif di bus i

Q_{Gi} = output daya reaktif generator di bus i

Q_{Di} = beban reaktif di bus i

Bila disubstitusi antara 2.4 dan 2.1 maka akan didapatkan

$$\frac{(P_{Gi} - P_{Di}) - (Q_{Gi} - Q_{Di})}{V_i} = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + \dots + Y_{in}V_n;$$

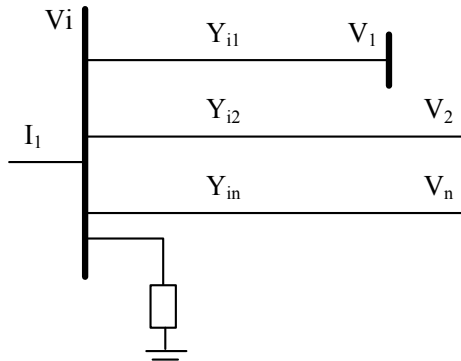
$$i = 1, 2, \dots, n \quad (2.6)$$

Dalam aliran daya, beban merupakan variabel yang diketahui, bila dipisah antara daya aktif dan reaktif maka:

$$P_i = P_{Gi} - P_{Di} \quad (2.7)$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} \quad (2.8)$$

Penggambaran bus secara umum pada suatu jaringan sistem tenaga listrik yang terdiri dari beberapa input dan output diberikan pada Gambar 2.4 berikut ini.



Gambar 2.4 Penggambaran Bus secara Umum

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (2.9)$$

Atau

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (2.10)$$

Substitusi nilai I_i pada 2.9 menghasilkan

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad j \neq 1 \quad (2.11)$$

Persamaan aliran daya tersebut diselesaikan dengan menggunakan suatu proses pengulangan (iterasi) dengan menetapkan nilai-nilai perkiraan untuk tegangan pada bus yang tidak diketahui nilainya dan kemudian menghitung suatu nilai baru untuk setiap tegangan bus dari nilai perkiraan pada bus yang lain. Setiap perhitungan suatu himpunan nilai tegangan yang baru disebut sebagai satu iterasi. Proses iterasi ini diulang terus-menerus hingga perubahan yang terjadi pada setiap bus kurang dari nilai minimum atau tidak melebihi nilai maksimum yang telah ditentukan.

2.4 Aliran Daya Optimal atau *Optimal Power Flow (OPF)*

Pada Tugas Akhir ini akan disimulasikan perhitungan *OPF* mempertimbangkan kestabilan tegangan dan penggunaan SVC pada sebuah sistem tenaga listrik.

2.4.1 Pengertian *Optimal Power Flow* ^[3]

Ide dari *optimal power flow* pertama kali dikembangkan pada tahun 1960an sebagai kelanjutan dari *economic dispatch* konvensional untuk menentukan pengaturan optimal dari variabel-variabel yang dibatasi berbagai macam konstrain. *Optimal power flow* merupakan perhitungan untuk meminimalkan suatu fungsi yaitu biaya pembangkitan suatu pembangkit tenaga listrik atau rugi-rugi saluran pada sistem tenaga transmisi dengan mengatur dengan mengatur pembangkitan daya aktif dan reaktif setiap pembangkit yang terinterkoneksi dengan memperhatikan batas-batas tertentu. Batas yang umum dinyatakan dalam perhitungan analisis aliran daya optimal adalah berupa batas minimum dan maksimum untuk pembangkitan daya aktif pada pembangkit.

OPF digunakan untuk mengoptimasi aliran daya dari sistem tenaga berskala besar. Cara ini dilakukan dengan mempersecil fungsi-fungsi objektif yang dipilih sambil mempertahankan daya guna sistem yang dapat diterima dari batas kemampuan daya pada generator.

Berikut ini merupakan fungsi sederhana yang digunakan dalam permasalahan OPF:

$$\begin{aligned} &F(\bar{x}, \bar{u}) \\ &g(\bar{x}, \bar{u}) \\ &h(\bar{x}, \bar{u}) \leq 0 \end{aligned}$$

Dimana $F(\bar{x}, \bar{u})$ untuk memenuhi batasan-batasan $g(\bar{x}, \bar{u}) = 0$ dan $h(\bar{x}, \bar{u}) \leq 0$, sedangkan $g(\bar{x}, \bar{u})$ adalah *nonlinier equality constraints* (persamaan aliran daya) yang menggambarkan fisik dari sistem seperti halnya *set point* tegangan yang diinginkan pada seluruh sistem. Fisik dari sistem tersebut memaksa persamaan aliran daya yang diinjeksikan terutama daya aktif dan daya reaktif pada setiap bus jumlahnya sama dengan nol dan $h(\bar{x}, \bar{u})$ adalah *nonlinier inequality constraints* merupakan komponen dari peralatan sistem tenaga listrik yang memiliki batas operasi, batas ini dibuat untuk keamanan. Oleh sebab itu, fungsi objektif dapat diminimalkan dengan pemeliharaan komponen sistem tenaga listrik dengan memperhatikan batas-batas keamanan. Vektor x terdiri dari nilai variabel-variabel meliputi *voltage magnitude* dan sudut fasanya, keluaran MVAR dari generator yang dirancang untuk pengaturan tegangan bus dan juga terdiri dari beberapa parameter-parameter yang bernilai tetap meliputi sudut fasa pada *reference bus*, line parameter, dll. Vektor u berdiri dari nilai variabel control meliputi daya aktif dan daya reaktif dari pembangkitan, beban MW dan MVAR.

Tujuan utama dari *OPF* adalah untuk menentukan pengaturan variabel kontrol dan sistem persamaan yang mengoptimalkan nilai fungsi objektif. Pemilihan fungsi ini harus didasarkan pada analisis yang cermat dari sistem daya listrik dan secara ekonomi. Variabel kontrol pada masalah aliran daya yang optimal merupakan kuantitas yang nilainya bisa disesuaikan secara langsung untuk membantu meminimalkan fungsi tujuan dan memenuhi batasan-batasan. Variabel kontrol dapat berupa: daya aktif generator, daya reaktif generator, rasio tap trafo dan tegangan bus generator.

OPF adalah upaya yang dilakukan dalam pengoperasian sistem tenaga listrik supaya daya yang dialirkan dari generator hingga sampai ke beban dengan hasil yang optimal dan murah serta tanpa mengganggu berbagai batasan-batasan pengoperasian seperti batasan minimum dan maksimum daya pembangkitan oleh generator, batasan tegangan, frekuensi, harga, faktor daya, batasan area pengoperasian, keamanan, emisi dan sebagainya.

2.4.2 Persamaan Matematis OPF

Persamaan dari *optimal power flow* dari segi biaya pembangkitan direpresentasikan pada persamaan 2.12.

$$F_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (2.12)$$

Keterangan :

F_i = besar biaya pembangkitan pada pembangkit ke- i (Rp)

P_i = daya *output* dari pembangkit ke- i (MW)

a_i , b_i dan c_i adalah *cost coefficient* unit generator ke- i

Dalam memecahkan suatu masalah optimasi, seperti OPF, ada dua batasan yaitu *equality* dan *inequality constraint*. *Equality constraint* adalah batasan yang harus diikuti. Sebagai contoh dalam OPF ada persamaan keseimbangan daya aktif dan daya reaktif pada setiap bus harus selalu dicukupi.

Equality constrain pada OPF mempunyai persamaan sebagai berikut:

$$P_i = P_{gi} - P_{di} = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (2.13)$$

$$Q_i = Q_{gi} - Q_{di} = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (2.14)$$

Dimana $i = 1, 2, \dots, n$ menyatakan jumlah bus. P_i dan Q_i menyatakan injeksi daya aktif dan reaktif di bus i . P_{gi} dan Q_{gi} menyatakan daya aktif dan reaktif generator di bus i . P_{di} dan Q_{di} menyatakan daya aktif dan reaktif beban di bus i . $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$ menyatakan elemen dari ke $i - j$ dari matrik Y bus matrik.

Inequality constraint menggambarkan batasan operasi dan batas ini dibuat untuk batas keamanan. Berikut ini persamaan *Inequality constraint* pada OPF sebagai berikut:

1) Batasan kapasitas pembangkit :

$$\begin{aligned} P_{gi}^{min} &\leq P_{gi} \leq P_{gi}^{max}, & i = 1, 2, 3, \dots, N_g \\ Q_{gi}^{min} &\leq Q_{gi} \leq Q_{gi}^{max}, & i = 1, 2, 3, \dots, N_g \end{aligned} \quad (2.15)$$

2) Batasan tegangan :

$$\begin{aligned} V_i^{min} &\leq V_i \leq V_i^{max}, & i = 1, 2, 3, \dots, N_g \\ \delta_i^{min} &\leq \delta_i \leq \delta_i^{max}, & i = 1, 2, 3, \dots, N_g \end{aligned} \quad (2.16)$$

3) Batasan termal transmisi :

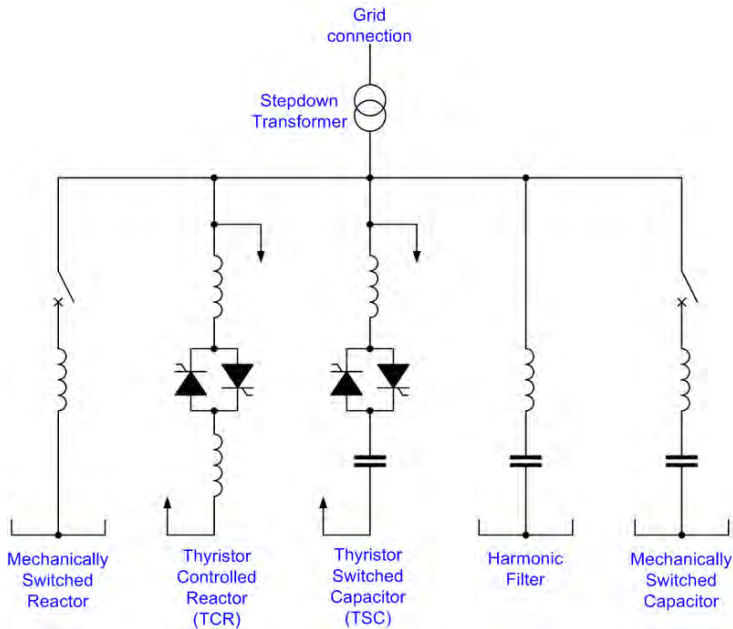
$$S_l \leq S_{l,max} \quad (2.17)$$

Dimana:

- P_i : Injeksi daya aktif di bus i
- Q_i : Injeksi daya reaktif di bus i
- Pg_{gi} : Daya aktif di bus i
- Pd_i : Pembebanan daya aktif pada bus i
- Qg_{gi} : Daya reaktif di bus i
- Pd_i : Pembebanan daya aktif di bus i
- δ_i : Sudut fasa tegangan bus i
- δ_j : Sudut fasa tegangan bus j

2.5 Static VAR Compensator (SVC)

Static VAR Compensator (atau disebut *SVC*) adalah peralatan listrik untuk menyediakan kompensasi *fast-acting reactive power* pada jaringan transmisi listrik tegangan tinggi. *SVC* adalah bagian dari sistem peralatan *AC* transmisi yang fleksibel, pengatur tegangan dan menstabilkan sistem. Istilah “*static*” berdasarkan pada kenyataannya bahwa pada saat beroperasi atau melakukan perubahan kompensasi tidak ada bagian (part) *SVC* yang bergerak, karena proses kompensasi sepenuhnya dikontrol oleh sistem elektronika daya.



Gambar 2.5 One-line Diagram dari konfigurasi SVC

Jika power sistem beban reaktif kapasitif (leading), SVC akan menaikkan daya reaktor untuk mengurangi *var* dari sistem sehingga tegangan sistem turun. Pada kondisi reaktif induktif (lagging), SVC akan mengurangi daya reaktor untuk menaikkan *var* dari sistem sehingga tegangan sistem akan naik.

Pada SVC pengaturan besarnya *var* dan tegangan dilakukan dengan mengatur besarnya kompensasi daya reaktif induktif pada reaktor, sedangkan kapasitor bank bersifat statis.



Gambar 2.6 SVC di Gardu Induk

2.5.1 Fungsi Static Var Compensator

Kebutuhan daya reaktif pada sistem dapat dipasok oleh unit pembangkit, sistem transmisi, reaktor dan kapasitor. Karena kebutuhan daya reaktif pada sistem bervariasi yang disebabkan oleh perubahan beban, komposisi unit pembangkit yang beroperasi, perubahan konfigurasi jaringan, hal ini berdampak pada bervariasinya level tegangan pada gardu induk. Pada umumnya gardu-gardu induk yang berada jauh dari pembangkit akan mengalami penurunan level tegangan yang paling besar, oleh sebab itu diperlukan sistem kompensasi daya reaktif yang dapat mengikuti perubahan tegangan tersebut.

SVC dapat dengan cepat memberikan *supply* daya reaktif yang diperlukan dari sistem sehingga besarnya tegangan pada gardu induk dapat dipertahankan sesuai dengan standar yang diizinkan. Kestabilan tegangan pada gardu induk akan meningkatkan kualitas tegangan yang sampai kekonsumen, mengurangi losses dan juga dapat meningkatkan kemampuan penghantar untuk mengalirkan arus.

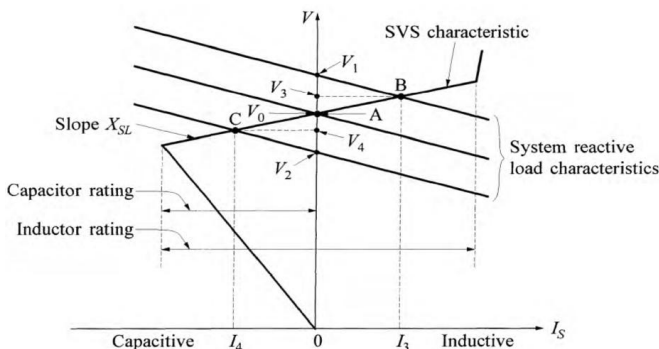
Pengaturan daya reaktif dilakukan dengan mengontrol besarnya daya reaktif pada reaktor, melalui pengaturan sudut penyulutan pada thyristor. Besarnya sudut penyulutan ini tergantung dari variasi tegangan pada gardu induk dengan kata lain semakin besar daya reaktif yang dibutuhkan maka sudut penyalan akan semakin kecil. Karena kontrol sudut penyalan ini dilakukan secara elektronik maka pengaturan tegangan dapat dilakukan secara lebih halus dan cepat. Thyristor pada kondisi beroperasi akan menghasilkan panas sehingga diperlukan sistem pendingin untuk mendinginkannya.

2.5.2 Cara Kerja SVC

SVC merupakan peralatan yang mampu bekerja dengan menyerap atau menghasilkan arus reaktif yang terkontrol dengan cara menyerap daya reaktif dari sistem atau menghasilkan daya reaktif untuk sistem. Ketika tegangan sistem rendah *SVC* menghasilkan daya reaktif (*SVC* kapasitif) namun ketika tegangan sistem tinggi *SVC* menyerap daya reaktif (*SVC* induktif).

SVC ini berfungsi untuk menyuntikkan atau menyerap daya reaktif statis yang terkontrol dan dihubungkan paralel yang mempunyai keluaran (*output*) yang bervariasi untuk mempertahankan atau mengontrol variabel tertentu pada sistem tenaga listrik, terutama tegangan bus. *SVC* terdiri dari TCR (*Thyristor Controlled Reactor*), TCS (*Thyristor Capacitor Switched*) dan filter. Filter berfungsi untuk mengatasi besarnya harmonisa yang dihasilkan oleh TCR.

Peralatan *static var compensator* (*SVC*) digunakan untuk mengkompensasi daya reaktif. *SVC* juga terdiri dari kapasitor, reaktor dan thyristor. Prinsip kerja *static var compensator* (*SVC*) yaitu dengan cara mengatur sudut penyalan thyristor, sehingga dapat mengatur keluaran daya reaktif dari *SVC* dan besarnya arus reaktor. Arus yang diterima oleh *SVC* merupakan penjumlahan dari arus kapasitor dan arus reaktor. Besarnya arus kapasitor tetap, yang dirubah adalah besarnya nilai reaktor yang tepat arus yang diterima oleh kompensator daya reaktif statis dapat divariasikan dari kapasitif hingga induktif. Nilai tegangan sistem merupakan input bagi pengendali, yang kemudian akan mengatur sudut penyalan thyristor. Dengan demikian, *SVC* akan memberikan kompensasi daya reaktif maupun mengambil daya reaktif yang sesuai dengan kebutuhan sistem. *SVC* diatur dalam mode pengaturan tegangan dengan $V_{ref} = 1 \text{ pu}$. Batas tegangan 0,03 pu berarti tegangan *SVC* bervariasi dari 0,97 pu sampai 1,03 pu saat arus *SVC* beranjak dari sepenuhnya kapasitif menjadi sepenuhnya induktif. Gambar 2.7 dibawah ini menunjukkan karakteristik *Static VAR Compensator*.



Gambar 2.7 karakteristik SVC [4]

2.6 Stabilitas Sistem Tenaga

Kestabilan sistem tenaga listrik didefinisikan sebagai kemampuan dari sistem untuk menjaga kondisi operasi yang seimbang dan kemampuan sistem tersebut untuk kembali ke kondisi operasi normal ketika terjadi gangguan. Sedangkan ketidakstabilan sistem dapat terjadi dalam berbagai bentuk, tergantung dari konfigurasi sistem dan model operasinya. Sistem akan masuk pada kondisi ketidakstabilan tegangan ketika terjadi gangguan, peningkatan beban atau pada saat terjadi perubahan kondisi sistem yang disebabkan oleh drop tegangan yang tidak terkontrol.

Penyebab utama ketidakstabilan tegangan adalah ketidak mampuan sistem tenaga untuk memenuhi permintaan daya reaktif. Inti dari permasalahan ini biasanya berhubungan dengan susut tegangan yang terjadi pada saat daya aktif dan daya reaktif mengalir melalui reaktansi induktif pada jaringan transmisi. Secara mendasar masalah kestabilan berarti menjaga sinkronisasi operasi sistem tenaga. Kestabilan pada sistem tenaga listrik merupakan masalah yang sangat penting dalam penyediaan daya kepada konsumen. Masalah kestabilan yang sering terjadi disini adalah masalah beban lebih, berkurangnya pasokan daya reaktif yang pada akhirnya akan menempatkan sistem pada kondisi *voltage collapse* dan akan terjadi kemungkinan terburuk yaitu terjadinya blackout. Ukuran fundamental untuk jarak sistem terhadap *voltage collapse* adalah *load margin* (λ).

Kestabilan tegangan biasanya termasuk saat terjadi gangguan besar (termasuk kenaikan beban / transfer daya yang sangat besar). Tegangan

akan mengalami osilasi, dan terjadi ketidakstabilan sistem kontrol. Maka dibutuhkan suatu *voltage security*, yaitu kemampuan sistem, tidak hanya untuk beroperasi secara stabil, tetapi juga stabil saat kondisi terburuk atau saat terjadi kenaikan beban.

Stabilitas sistem tenaga telah menjadi perhatian utama dalam sebuah sistem operasi. Perhatian itu muncul dari fakta bahwa pada kondisi keadaan mantap (steady-state), kecepatan rata-rata untuk semua generator harus sama. Kondisi tersebut dinamakan pada operasi sinkron dari sebuah sistem yang terinterkoneksi. Gangguan kecil atau besar pada sistem tenaga berdampak pada operasi sinkron. Sebagai contoh, kenaikan atau ketrurunan tiba-tiba pada beban, atau akibat rugi pembangkitan menjadi salah satu jenis gangguan yang berpengaruh sangat signifikan terhadap sistem. Jenis lain dari gangguan adalah jaring transmisi yang terputus, beban lebih, atau hubung singkat. Dengan demikian diharapkan stabilitas sistem akan menuju ke keadaan mantap dalam waktu singkat setelah gangguan menghilang.

2.7 Kestabilan Tegangan

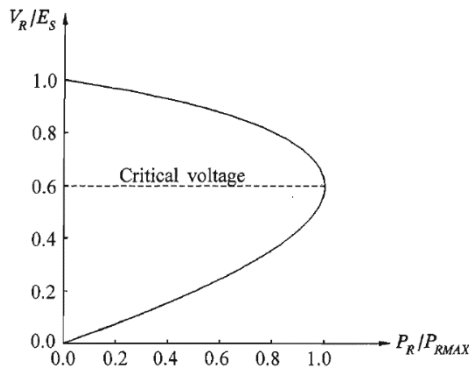
Kestabilan tegangan kini memperoleh perhatian lebih karena pesatnya perkembangan beban membuat sistem semakin terbebani [5]. Kestabilan tegangan adalah kemampuan sistem untuk menjaga tegangan sistem pada seluruh bus tetap berada dalam batas kestabilan saat kondisi normal atau setelah terjadi gangguan.[6]

Ketidakstabilan tegangan dapat terjadi karena adanya gangguan, baik gangguan kecil berupa peningkatan pembebanan ataupun gangguan besar seperti lepasnya unit pembangkit besar atau perubahan permintaan daya dalam jumlah yang besar. Ketidakstabilan tegangan dapat mengakibatkan keruntuhan tegangan, profil tegangan yang sangat rendah disebagian besar sistem yang berpotensi menimbulkan blackout pada sistem.

Pendekatan statis lebih dipilih karena memiliki kelebihan-kelebihan seperti mampu memberikan informasi tentang tingkat kestabilan tegangan sistem, jarak kondisi sistem dengan batas wilayah ketidakstabilan tegangan, serta mampu menginformasikan bus atau saluran yang menjadi penyebab sistem memasuki wilayah ketidakstabilan tegangan. Salah satu metode yang digunakan pada pendekatan statis adalah menggunakan indeks kestabilan tegangan (VSI).

2.7.1 Kriteria kestabilan tegangan

Kurva P-V diperoleh dengan cara melakukan simulasi aliran daya dimana beban mengalami perubahan. Simulasi ini akan menghasilkan nilai-nilai magnitude tegangan dan daya aktif pada suatu bus yang senantiasa berubah membentuk sebuah kurva yang berbentuk ‘hidung (nose)’. Titik balik dari kurva P-V merupakan titik kritis pembebanan atau titik pembebanan maksimum seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.8. Wilayah di atas titik kritis merupakan wilayah operasi yang masih stabil dan wilayah di bawah titik kritis merupakan wilayah operasi yang tidak stabil.



Gambar 2.8 kurva P-V

2.7.2 Mekanisme Ketidakstabilan Tegangan

Perpotongan antara kurva P-V yang menunjukkan karakteristik transmisi dan kurva karakteristik beban merupakan titik operasi sistem tenaga listrik. Perubahan pada salah satu kurva tersebut dapat mengakibatkan perubahan pada titik operasi sistem. Perubahan pada kurva P-V menunjukkan adanya perubahan pada sistem transmisi sedangkan perubahan pada kurva karakteristik beban menunjukkan adanya perubahan daya yang diserap beban. Ketidakstabilan dan runtuh tegangan dapat terjadi apabila tidak ada titik potong antara kurva P-V dengan kurva karakteristik beban keadaan tunak, dengan kata lain beban akan cenderung untuk menyerap daya lebih besar dibandingkan kemampuan sistem transmisi. Pada kondisi ini kurva karakteristik beban berada diluar kurva P-V sistem. Perubahan pada

kurva P-V dan kurva karakteristik beban dapat mendorong terjadinya mekanisme tersebut.

1) Perubahan sistem transmisi

Terjadinya perubahan pada sistem transmisi, misalnya terlepasnya salah satu saluran transmisi karena gangguan, dapat menyebabkan perubahan pada karakteristik saluran transmisi (perubahan nilai impedansi total 0. Perubahan ini menyebabkan daya yang dikirimkan menjadi lebih besar dibandingkan kemampuan saluran transmisi sehingga mendorong sistem ke dalam ketidakstabilan tegangan.

2) Perubahan beban

Kenaikan beban membuat daya yang diserap beban berada di luar batas kemampuan sistem transmisi dan menyebabkan terjadinya ketidakstabilan dan runtuh tegangan. Mekanisme terjadinya ketidakstabilan tegangan.

2.8 Optimisasi *Sequential Quadratic Programming* (SQP)^[7]

Sequential Quadratic Programming (SQP) adalah metode paling populer untuk *nonlinear constrained optimization*. Metode SQP bekerja dengan mengkonversi fungsi-fungsi umum menjadi fungsi kuadrat. Metode ini menghasilkan subproblem dari quadratic programming pada tiap iterasi, dan solusi dari subproblem ini dapat digunakan untuk menentukan nilai taksiran dari solusi di iterasi berikutnya. Jika penyelesaian awal dari sebuah fungsi dinyatakan dengan $x^{(0)}$, maka deret Taylor orde kedua dari $f(x)$ tertulis sebagai berikut.

$$q(x) = f(x^{(0)}) + \nabla f(x^{(0)})^T (x - x^{(0)}) + \frac{1}{2} (x - x^{(0)})^T \nabla^2 f(x^{(0)}) (x - x^{(0)})$$

Metode yang kita bahas pada bagian ini adalah untuk menaksir nilai *objective function* dengan fungsi kuadrat. Sedangkan nilai batasan-batasan ditaksir dengan fungsi linear. Jika hasil akhir pada iterasi ke t dari persoalan di atas dilambangkan dengan $x^{(t)}$, maka persoalan *quadratic programming* menjadi seperti di bawah ini

$$\begin{aligned} & f(x^{(t)}) + \nabla f(x^{(t)})^T (x^{(t+1)} - x^{(t)}) && \min \\ & + \frac{1}{2} (x^{(t+1)} - x^{(t)})^T \nabla^2 f(x^{(t)}) (x^{(t+1)} - x^{(t)}) \end{aligned}$$

dengan

$$h_k(x^{(t)}) + \nabla h_k(x^{(t)})^T (x^{(t+1)} - x^{(t)}) = 0 \quad \text{untuk } k=1,2,..K$$

$$g_j(x^{(t)}) + \nabla g_j(x^{(t)})^T (x^{(t+1)} - x^{(t)}) \geq 0 \quad \text{untuk } g=1,2,..J$$

Metode *SQP* digunakan untuk menaksir nilai fungsi objektif dengan fungsi kuadratik pada program *Matpower* yang dimodifikasi ke dalam *software MATLAB*.

2.9 Matpower^[8]

Matpower adalah sebuah paket dari MATLAB M-File yang berguna untuk menyelesaikan permasalahan sistem tenaga listrik. Permasalahan yang dimaksud adalah tentang studi aliran daya dan OPF. Paket ini berisi *tools* simulasi untuk para peneliti dan pelaku pendidikan yang dapat digunakan dan dimodifikasi dengan mudah. Hal ini dikarenakan Matpower memang didisain untuk memberikan hasil simulasi terbaik yang mudah dimengerti.

Matpower menyediakan *steady-state* model dari sistem kelistrikan standar yang biasanya digunakan untuk analisis aliran daya. Dalam analisi menggunakan Matpower, biasanya semua nilai dari besaran-besaran yang dianalisis dinyatakan dalam satuan per unit dan sudut dari bilangan kompleks dinyatakan dalam satuan radian. Dan biasanya semua generator dan cabang yang *offline* dihilangkan sebelum membentuk model untuk menyelesaikan problem aliran daya atau OPF. Dalam simulasi dengan Matpower semua bus diberi nomor berurutan, dimulai pada 1, dan generator disebut berdasarkan nomer bus di mana generator tersebut terhubung. Berdasarkan kelebihan dari bahasa pemrograman MATLAB dalam menangani matriks dan vektor, maka model dan persamaan yang disajikan di Matpower juga dalam matriks dan bentuk vektor.

2.9.1 OPF di dalam Matpower

Program matpower dapat menyelesaikan permasalahan AC dan DC optimal power flow. Permasalahan optimal power flow pada umumnya ditulis sebagai berikut :

$$\min_x f(x) \quad (2.18)$$

subject to

$$g(x) = 0 \quad (2.19)$$

$$h(x) \leq 0 \quad (2.20)$$

$$x_{min} \leq x \leq x_{max} \quad (2.21)$$

Optimasi vektor x terdiri dari magnitude tegangan V_m dan sudut fasa tegangan θ , daya aktif P_g dan daya reaktif injeksi Q_g , maka x dituliskan.

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ V_m \\ P_g \\ Q_g \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Fungsi objektif di OPF matpower ini adalah penjumlahan fungsi polinomial biaya dari injeksi daya aktif dan daya reaktif untuk tiap generator.

$$\min_{\theta, V_m, P_g, Q_g} \sum_{i=1}^{n_g} f_p^i(p_g^i) + f_Q^i(Q_g^i) \quad (2.23)$$

Pada persamaan (2.19), fungsi $g(x) = 0$ disebut dengan *equality constraints* (batasan kesamaan) yang meliputi dua himpunan dari nb nonlinear bus persamaan keseimbangan daya, satu himpunan untuk daya aktif dan lainnya untuk daya reaktif.

$$gP(\theta, V, P) = 0$$

$$gQ(\theta, V, P) = 0$$

Sedangkan fungsi $h(x) \leq 0$ disebut dengan *inequality constraints* (batasan ketidaksamaan) yang meliputi dua himpunan dari n_l cabang, yang mewakili fungsi non-linear batasan aliran daya pada cabang. Dalam fungsi ini mencakup besarnya tegangan dan sudut tegangan dari satu bus (h_f) ke bus yang lain h_t .

$$h_f(\theta, V) \leq 0$$

$$h_t(\theta, V) \leq 0$$

Untuk batasan yang dimaksud pada persamaan $x_{min} \leq x \leq x_{max}$ meliputi:

$$\theta_{ref} \leq \theta_i \leq \theta_{ref}$$

$$v_{min} \leq v_i \leq v_{max}$$

$$P_{min} \leq P_i \leq P_{max}$$

$$Q_{min} \leq Q_i \leq Q_{im}$$

Dimana :

θ_i = Sudut tegangan pada bus i

v_i = besar nilai tegangan pada bus i

P_i = besar daya aktif yang dihasilkan generator i

Q_i = besar daya reaktif yang dihasilkan generator i

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III

PENERAPAN *SEQUENTIAL QUADRATIC PROGRAMMING* PADA ALIRAN DAYA OPTIMAL

Dalam bab ini akan dijelaskan mengenai penerapan *sequential quadratic programming* untuk menyelesaikan permasalahan aliran daya optimal atau *optimal power flow* yang mempertimbangkan kestabilan tegangan dan penggunaan *static var compensator* pada suatu sistem kelistrikan. Pengolahan data dan simulasi dikerjakan dengan menggunakan *program matpower*[8] yang dimodifikasi pada *software MATLAB*.

3.1 Algoritma

Pengerjaan Tugas Akhir dimulai dengan pengumpulan data saluran, data beban serta data pembangkit pada sistem IEEE 14 bus, IEEE 30 bus dan Sistem 25 bus Jawabali yang telah dimodifikasi. Kemudian sistem tersebut dimodelkan dalam casefile menggunakan *M-file MATLAB*. Setelah itu ditentukan fungsi objektif, variabel yang dioptimasi serta batasan permasalahan dari aliran daya optimal atau *optimal power flow* (OPF). Dikarenakan perhitungan *OPF* disini mempertimbangkan kestabilan tegangan dan juga penggunaan *static var compensator*, maka perhitungan dilakukan dalam dua kondisi yaitu saat *operating point* dan *collapse point*. Kondisi pertama ,yaitu saat *operating point* dimana total beban adalah beban awal yang telah ditentukan. Dan untuk kondisi kedua yaitu beban dinaikkan sebesar beberapa *percent* dari total beban awal. Untuk kenaikan beban pada kondisi kedua digunakan *load margin* (λ) yang dirumuskan:

$$P_c = (1 + \lambda) \times P_o$$

Dimana:

P_o = beban saat kondisi awal

P_c = beban saat kondisi kedua

λ = *load margin*

Load margin adalah suatu ukuran atau jarak sistem terhadap *voltage collapse*[2]. Dan juga dilakukan pemasangan *static var compensator* (SVC) pada beberapa bus yang terpilih. *SVC* pada tugas

akhir ini disimulasikan sebagai generator yang hanya mensupai daya reaktif saja. Penambahan *SVC* ini dilakukan agar dapat terlihat pengaruh dari penggunaan *SVC* pada suatu sistem tenaga listrik. Kemudian dilakukan perbandingan terhadap hasil perhitungan *OPF* untuk masing-masing kondisi. Perbandingan meliputi hasil pembangkitan dan biaya pembangkitan. Dari hasil perbandingan dianalisis dan disimpulkan sebagai kesimpulan dalam Tugas Akhir.

3.2 Sequential Quadratic Programming (fmincon)

Sequential Quadratic Programming (SQP) merupakan salah satu metode iterative untuk optimasi nonlinier dimana metode ini menggunakan pendekatan *Lagrange* dan *Newton* tanpa harus mengkonversikan ke barisan persoalan minimisasi yang tidak berkendala. Metode *SQP* bekerja dengan mengkonversi persoalan nonlinier menjadi bentuk persoalan pemrograman kuadratik. Metode ini menghasilkan subproblem dari *quadratic programming* pada tiap iterasi, dan solusi dari subproblem ini dapat digunakan untuk menentukan nilai taksiran dari solusi di iterasi berikutnya.

3.2.1 Sintaksis Sequential Quadratic Programming (fmincon)

- $x = \text{fmincon}(\text{fun}, x_0, A, b)$
Untuk meminimalkan fungsi x dengan nilai awal x_0 yang diuraikan dalam fungsi fun pada *inequality constraints* linear $A * x \leq b$, dimana x_0 akan menjadi skalar, vector, atau matrix.
- $x = \text{fmincon}(\text{fun}, x_0, A, b, Aeq, beq)$
Meminimalkan subjek fun ke *equality constraints* linear $Aeq * x = beq$ dan $A * x \leq b$. Jika tidak ada *inequalities*, maka $A = []$ dan $B = []$.
- $x = \text{fmincon}(\text{fun}, x_0, A, b, Aeq, beq, lb, ub)$
Mendefinisikan batas bawah dan batas atas dalam fariabel x , sehingga solusinya akan selalu dalam batasan $lb \leq x \leq ub$. Jika ada *equality* yang tidak mempunyai batasan, maka $Aeq = []$ dan $beq = []$, dan jika lb tidak terbatas diseting $lb = -inf$ begitu juga untuk ub .
- $x = \text{fmincon}(\text{fun}, x_0, A, b, Aeq, beq, lb, ub, nonlcon)$
Meminimalkan *inequality constraints* nonlinear $c(x)$ atau *equality constraints* $CEQ(x)$ yang di definisikan dalam

nonlcon. `fmincon` mengoptimalkan sedemikian rupa sehingga $c(x) \leq 0$ dan $CEQ(x) = 0$.

- $x = \text{fmincon}(\text{fun}, x_0, A, b, A_{eq}, b_{eq}, lb, ub, \text{nonlcon}, \text{options})$
Meminimalkan dengan optimasi *option* yang ditentukan dalam struktur *option*, dengan optimset untuk setingan *option*. Jika tidak terdapat batasan *equality constraints* dan *inequality constraints* maka `nonlcon = []`.
- $x = \text{fmincon}(\text{problem})$
Mendapatkan nilai minimum untuk *problem*, dimana struktur *problem* dijelaskan dalam *input argument*.
- $[x, fval] = \text{fmincon}(\dots)$
Mengembalikan nilai objektif dari fungsi *fun* pada solusi x .
- $[x, fval, \text{exitflag}] = \text{fmincon}(\dots)$
Mengisikan kembali nilai *exitflag* yang mendeskripsikan kondisi keluaran *fmincon*.
- $[x, fval, \text{exitflag}, \text{output}] = \text{fmincon}(\dots)$
Mengisikan kembali stuktur keluaran dengan informasi tentang optimasi.
- $[x, fval, \text{exitflag}, \text{output}, \text{lambda}] = \text{fmincon}(\dots)$
Mengisikan kembali stuktur *lambda* dengan bagian yang berisi pengali *Lagrange* sebagai solusi x .
- $[x, fval, \text{exitflag}, \text{output}, \text{lambda}, \text{grad}] = \text{fmincon}(\dots)$
Mengisikan kembali nilai *gradient* sebagai solusi x .
- $[x, fval, \text{exitflag}, \text{output}, \text{lambda}, \text{grad}, \text{hessian}] = \text{fmincon}(\dots)$
Mengisikan kembali nilai nilai dari *hessian* sebagai solusi x .

3.2.2 Input Argumen dari *Sequential Quadratic Programming (fmincon)*

- | | |
|-------|--|
| Fun | Sebuah fungsi yang dimaksimalkan dan merupakan fungsi yang diisikan fektor x kemudian mengembalikan skalar f yang fungsi tujuan dievaluasi pada x . Pada penulisannya di MATLAB <i>myfun</i> . |
| x_0 | <i>Optional</i> . Vektor yang menyatakan <i>initial point</i> dari algoritma <i>fmincon</i> . |
| Aineq | Matrik yang menyatakan koefisien linier dari <i>inequality constraints</i> $A * x \leq b$. |
| bineq | Vektor yang menyatakan vector konstan pada <i>inequality constraints</i> $A * x \leq b$. |

- Aeq Matrik yang menyatakan koefisien linier dari *equality constraints* $Aeq * x = beq$.
- Beq Vektor yang menyatakan vector konstan dari *equality constraints* $Aeq * x = beq$.
- Lb Vektor yang menyatakan batas bawah dari permasalahan $lb \leq x \leq ub$.
- Ub Vektor yang menyatakan batas atas dari permasalahan $lb \leq x \leq ub$.
- Nonlcon fungsi untuk batasan *nonlinier*.

3.2.3 Sequential Quadratic Programming pada OPF

Pada tugas akhir ini, SQP menggunakan program *Matpower* yang sudah di modifikasi pada *software MATLAB*.

3.2.3.1 Inisialisasi Permasalahan OPF

Cost function sebagai persamaan kuadratik

$$F_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (3.1)$$

P_i adalah daya keluaran dari unit ke- i dan a_i, b_i dan c_i adalah *cost coefficient* unit generator ke- i maka,

$$\text{minimize } C = \sum_{i=1}^K \sum_{i=1}^N F_i(P_{ik}) \quad (3.2)$$

Subject to

- *Equality constraint*

Equality constraint dari permasalahan *optimal power flow* ditunjukkan pada persamaan:

$$P_i^t = P_{gi}^t - P_{di}^t = \sum_{j=1}^n V_i^t V_j^t (G_{ij} \cos \theta_{ij}^t + B_{ij} \sin \theta_{ij}^t) \quad (3.3)$$

$$Q_i^t = Q_{gi}^t - Q_{di}^t = \sum_{j=1}^n V_i^t V_j^t (G_{ij} \sin \theta_{ij}^t - B_{ij} \cos \theta_{ij}^t) \quad (3.4)$$

Dimana $i = 1, 2, \dots, n$ dan $\theta_{ij}^t = \theta_i^t - \theta_j^t$, yang menyatakan sudut tegangan dari dua bus yang berubah-ubah pada setiap saluran, dan n di representasikan sebagai jumlah bus, P_i^t dan Q_i^t adalah injeksi daya aktif dan reaktif di bus i . P_{gi}^t dan Q_{gi}^t adalah pembangkitan daya aktif dan reaktif pada generator ke- i , sedangkan untuk P_{di}^t dan Q_{di}^t adalah

pembangkitan daya aktif dan reaktif pada beban ke- i . G_{ij} dan B_{ij} juga didefinisikan sebagai:

$Y_{ij} \angle \theta_{ij} = G_{ij} - jB_{ij}$, dimana Y_{ij} adalah elemen matrik admitansi ke- ij .

- *Inequality constraint*

Inequality constraint dari permasalahan *optimal power flow* ditunjukkan pada persamaan

$$P_{gi \min} \leq P_{gi}^t \leq P_{gi \max} \quad (3.5)$$

$$Q_{gi \min} \leq Q_{gi}^t \leq Q_{gi \max} \quad (3.6)$$

$$V_{i \min} \leq V_i^t \leq V_{i \max}, i = 1, 2, \dots, N_{bus} \quad (3.7)$$

$$|P_{ij}^t| \leq P_{ij \max} \quad (3.8)$$

dimana P_{ij}^t adalah daya yang mengalir antara bus i dan bus j . V_i^t adalah tegangan amplitudo pada bus i , $V_{i \min}$ dan $V_{i \max}$ adalah tegangan minimum dan maksimum dari tiap bus. $P_{ij \max}$ adalah daya maksimum yang melewati saluran. P_{gimin} dan P_{gimax} adalah daya aktif minimum dan maksimum pada generator ke- i , sedangkan Q_{gimin} dan Q_{gimax} adalah daya reaktif minimum dan maksimum pada generator ke- i .

3.2.3.2 Inisialisasi x_0 Sebagai Nilai Awal

Dalam pemograman optimasi dengan fungsi *fmincon* membutuhkan input argumen x_0 sebagai nilai awal. Variabel x_0 terdiri dari sudut tegangan, magnitudo tegangan, daya aktif dan reaktif. Misal dengan sistem 2 generator ($ng=2$), 3 bus ($nb=3$). Maka matrik x_0 dapat ditulis pada persamaan berikut:

$$\mathbf{x}_0 = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ P_{g1} \\ P_{g2} \\ Q_{g1} \\ Q_{g2} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Sedangkan untuk 2 kondisi dimana beban kondisi kedua lebih besar dari beban awal, maka ukuran matrik \mathbf{x}_0 dimodifikasi menjadi:

$$\mathbf{x}_0 = \begin{bmatrix} \theta_1 \text{ o} \\ \theta_2 \text{ o} \\ \theta_3 \text{ o} \\ v_1 \text{ o} \\ v_2 \text{ o} \\ v_3 \text{ o} \\ P_{g1} \text{ o} \\ P_{g2} \text{ o} \\ Q_{g1} \text{ o} \\ Q_{g2} \text{ o} \\ \vdots \\ \theta_1 \text{ c} \\ \theta_2 \text{ c} \\ \theta_3 \text{ c} \\ v_1 \text{ c} \\ v_2 \text{ c} \\ v_3 \text{ c} \\ P_{g1} \text{ c} \\ P_{g2} \text{ c} \\ Q_{g1} \text{ c} \\ Q_{g2} \text{ c} \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \left. \vphantom{\begin{matrix} \theta_1 \text{ o} \\ \theta_2 \text{ o} \\ \theta_3 \text{ o} \\ v_1 \text{ o} \\ v_2 \text{ o} \\ v_3 \text{ o} \\ P_{g1} \text{ o} \\ P_{g2} \text{ o} \\ Q_{g1} \text{ o} \\ Q_{g2} \text{ o} \end{matrix}} \right\} \text{Kondisi awal} \\ \left. \vphantom{\begin{matrix} \theta_1 \text{ c} \\ \theta_2 \text{ c} \\ \theta_3 \text{ c} \\ v_1 \text{ c} \\ v_2 \text{ c} \\ v_3 \text{ c} \\ P_{g1} \text{ c} \\ P_{g2} \text{ c} \\ Q_{g1} \text{ c} \\ Q_{g2} \text{ c} \end{matrix}} \right\} \text{Kondisi kedua} \end{array} \quad (3.11)$$

x_0 merupakan nilai awal untuk memulai proses pencarian variable yang dioptimasi.

3.2.3.3 Pembentukan fungsi objektif F dan DF

F adalah nilai biaya pembangkitan sedangkan DF adalah turunan dari fungsi pembangkitan. Nilai F akan dijumlahkan pada setiap level beban dan dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$F = \sum_{i=1}^{jam} F_i \quad (3.12)$$

Misal dengan sistem 3 generator ($ng=3$) dan 4 bus ($nb=4$) maka ukuran matrik DF sebagai berikut :

$$DF = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{dF}{dP_{g1}} \\ \frac{dF}{dP_{g2}} \\ \frac{dF}{dP_{g3}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Sedangkan untuk OPF dengan dua kondis yaitu saat *operating point* dan *collapse point*, maka ukuran matrik DF menjadi dua kali lipat dimana bila saat satu kondisi ukuran matrik 1 by 10 ,maka matrik DF dengan dua kondisi menjadi 1 by 20 yang direpresentasikan berikut:

$$\mathbf{DF} = \begin{bmatrix} 0_1 \\ 0_1 \\ 0_1 \\ 0_1 \\ 0_1 \\ 0_1 \\ \frac{dF}{dP_{g^1_1}} \\ \frac{dF}{dP_{g^2_1}} \\ 0_1 \\ 0_1 \\ \vdots \\ 0_c \\ 0_c \\ 0_c \\ 0_c \\ 0_c \\ 0_c \\ \frac{dF}{dP_{g^1_c}} \\ \frac{dF}{dP_{g^2_c}} \\ 0_c \\ 0_c \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \left. \vphantom{\begin{matrix} 0_1 \\ 0_1 \\ 0_1 \\ 0_1 \\ 0_1 \\ 0_1 \\ \frac{dF}{dP_{g^1_1}} \\ \frac{dF}{dP_{g^2_1}} \end{matrix}} \right\} \text{Kondisi awal} \\ \left. \vphantom{\begin{matrix} 0_c \\ 0_c \\ 0_c \\ 0_c \\ 0_c \\ 0_c \\ \frac{dF}{dP_{g^1_c}} \\ \frac{dF}{dP_{g^2_c}} \end{matrix}} \right\} \text{Kondisi kedua} \end{array} \quad (3.14)$$

3.2.3.4 Pembentukan Equality Constraint Berupa Matrik \mathbf{g} dan \mathbf{dg}

Equality Constraint dalam permasalahan *optimal power flow* dijadikan dalam suatu matrik \mathbf{g} dan \mathbf{dg} , dimana \mathbf{g} dan \mathbf{dg} disebut sebagai *power balance*. Misal dengan sistem 2 generator ($ng=2$), 3 bus ($nb=3$). Maka ukuran matrik awal dari \mathbf{g} sebagai berikut:

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} P_{L1} \\ \vdots \\ P_{L3} \\ Q_{L1} \\ \vdots \\ Q_{L3} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Sedangkan untuk *OPF* dengan dua kondisi yaitu saat *operating point* dan *collapse point*, maka ukuran matrik \mathbf{g} menjadi dua kali lipat dimana bila saat satu kondisi ukuran matrik $[nb: 1]$, maka matrik \mathbf{g} dengan dua kondisi menjadi $[2*nb: 1]$, maka matrik tersebut dimodifikasi menjadi :

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} P_{L1\ 1} \\ \vdots \\ P_{L3\ 1} \\ Q_{L1\ 1} \\ \vdots \\ Q_{L3\ 1} \\ \vdots \\ P_{L1\ t} \\ \vdots \\ P_{L3\ t} \\ Q_{L1\ t} \\ \vdots \\ Q_{L3\ t} \end{bmatrix} \begin{array}{l} \left. \vphantom{\begin{matrix} P_{L1\ 1} \\ \vdots \\ P_{L3\ 1} \end{matrix}} \right\} \text{Beban daya aktif kondisi awal} \\ \left. \vphantom{\begin{matrix} Q_{L1\ 1} \\ \vdots \\ Q_{L3\ 1} \end{matrix}} \right\} \text{Beban daya reaktif kondisi awal} \\ \left. \vphantom{\begin{matrix} P_{L1\ t} \\ \vdots \\ P_{L3\ t} \end{matrix}} \right\} \text{Beban daya aktif kondisi kedua} \\ \left. \vphantom{\begin{matrix} Q_{L1\ t} \\ \vdots \\ Q_{L3\ t} \end{matrix}} \right\} \text{Beban daya reaktif kondisi kedua} \end{array} \quad (3.16)$$

Untuk $d\mathbf{g}$ adalah turunan dari \mathbf{g} , pada matrik $d\mathbf{g}$ untuk setiap bagian diturunkan terhadap bagian tersebut, maka bagian yang lain menjadi nol, bila dimisalkan b adalah jumlah pembangkitan setiap bus, maka matriknya akan digambarkan sebagai berikut:

$$\begin{array}{c}
\text{aktif power balance} \quad \text{reaktif power balance} \\
\mathbf{dg} = \begin{bmatrix}
\frac{geq}{d\theta_{11}} & \cdots & \frac{geq}{d\theta_{1b}} & \frac{geq}{d\theta_{11}} & \cdots & \frac{geq}{d\theta_{1b}} \\
\vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
\frac{geq}{d\theta_{n1}} & \cdots & \frac{geq}{d\theta_{nb}} & \frac{geq}{d\theta_{n1}} & \cdots & \frac{geq}{d\theta_{nb}} \\
\frac{G}{dV_{m11}} & \cdots & \frac{G}{dV_{m1b}} & \frac{geq}{dV_{m11}} & \cdots & \frac{geq}{dV_{m1b}} \\
\vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
\frac{geq}{dV_{m_{n1}}} & \cdots & \frac{geq}{dV_{m_{nb}}} & \frac{geq}{dV_{m_{n1}}} & \cdots & \frac{geq}{dV_{m_{nb}}} \\
\frac{geq}{dPg_{11}} & \cdots & \frac{geq}{dPg_{1b}} & \frac{geq}{dPg_{11}} & \cdots & \frac{geq}{dPg_{1b}} \\
\vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
\frac{geq}{dPg_{n1}} & \cdots & \frac{geq}{dPg_{nb}} & \frac{geq}{dPg_{n1}} & \cdots & \frac{geq}{dPg_{nb}} \\
\frac{geq}{dQ_{g11}} & \cdots & \frac{geq}{dQ_{g_{nb}}} & \frac{geq}{dQ_{g11}} & \cdots & \frac{geq}{dQ_{g_{nb}}} \\
\vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
\frac{geq}{dQ_{gn1}} & \cdots & \frac{geq}{dQ_{g_{nb}}} & \frac{geq}{dQ_{gn1}} & \cdots & \frac{geq}{dQ_{g_{nb}}}
\end{bmatrix}
\end{array} \quad (3.17)$$

Sedangkan untuk dua kondisi maka ukuran matrik **dg** adalah :
 $[\{2(nb+ng)\} : \{2*nb\}]$, , maka matrik tersebut dimodifikasi menjadi :

$$\mathbf{dg} = \begin{bmatrix} \mathbf{dg}_o & 0 \\ 0 & \mathbf{dg}_c \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Dimana:

dg_o = matrik **dg** saat keadaan awal (*operating point*)

dg_c = matrik **dg** saat kondisi kedua (beban naik $(1+\lambda)$ beban awal)

3.2.3.5 Pembentukan Inequality Constraint berupa matrik **h** dan **dh**

Inequality Constraint dalam permasalahan *optimal power flow* dijadikan dalam matrik **h** dan **dh**, dimana **h** dan **dh** disebut sebagai *power branch flow* yaitu batasan aliran daya pada saluran yaitu *from bus limit* dan *to bus limit*. Misal dengan sistem 3 generator ($ng=3$), 4 bus ($nb=4$) dan 2 saluran ($nbr=2$) Maka ukuran matrik awal dari **h** sebagai berikut:

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

dengan F adalah *from bus flow* dan T adalah *to bus flow*. Untuk *OPF* dengan dua kondisi yaitu saat *operating point* dan *collapse point*, maka ukuran matrik \mathbf{h} menjadidua kali lipat dimana bila saat satu kondisi ukuran matrik $[nb: 1]$, maka matrik \mathbf{h} dengan dua kondisi menjadi $[2*nb: 1]$, maka matrik tersebut dimodifikasi menjadi :

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} F_{1o} \\ F_{2o} \\ F_{3o} \\ T_{1o} \\ T_{2o} \\ T_{3o} \\ \vdots \\ F_{1c} \\ F_{2c} \\ F_{3c} \\ T_{1c} \\ T_{2c} \\ T_{3c} \end{bmatrix} \begin{array}{l} \left. \begin{array}{l} F_{1o} \\ F_{2o} \\ F_{3o} \end{array} \right\} \text{From bus kondisi awal} \\ \left. \begin{array}{l} T_{1o} \\ T_{2o} \\ T_{3o} \end{array} \right\} \text{To bus kondisi awal} \\ \left. \begin{array}{l} F_{1c} \\ F_{2c} \\ F_{3c} \end{array} \right\} \text{From bus kondisi 2} \\ \left. \begin{array}{l} T_{1c} \\ T_{2c} \\ T_{3c} \end{array} \right\} \text{To bus kondisi 2} \end{array} \quad (3.20)$$

Sedangkan untuk $d\mathbf{h}$ adalah turunan dari \mathbf{h} , bila nbr adalah jumlah saluran maka matrik dg sebagai berikut:

$$\begin{array}{c}
\text{aktif power branch} \quad \quad \text{reaktif power branch} \\
\begin{array}{cccccc}
\frac{h}{d\theta_{11}} & \cdots & \frac{h}{d\theta_{1(nbr)}} & \frac{h}{d\theta_{11}} & \cdots & \frac{h}{d\theta_{1(nbr)}} \\
\vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
\frac{h}{d\theta_{n1}} & \cdots & \frac{h}{d\theta_{n(nbr)}} & \frac{h}{d\theta_{n1}} & \cdots & \frac{h}{d\theta_{n(nbr)}} \\
\frac{h}{dVm_{11}} & \cdots & \frac{h}{dVm_{1(nbr)}} & \frac{h}{dVm_{11}} & \cdots & \frac{h}{dVm_{1(nbr)}} \\
\vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
\frac{h}{dVm_{n1}} & \cdots & \frac{h}{dVm_{n(nbr)}} & \frac{h}{dVm_{n1}} & \cdots & \frac{h}{dVm_{n(nbr)}} \\
\frac{h}{dPg_{11}} & \cdots & \frac{h}{dPg_{1(nbr)}} & \frac{h}{dPg_{11}} & \cdots & \frac{h}{dPg_{1(nbr)}} \\
\vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
\frac{h}{dPg_{n1}} & \cdots & \frac{h}{dPg_{n(nbr)}} & \frac{h}{dPg_{n1}} & \cdots & \frac{h}{dPg_{n(nbr)}} \\
\frac{h}{dPQ_{11}} & \cdots & \frac{h}{dPQ_{1(nbr)}} & \frac{h}{dPQ_{11}} & \cdots & \frac{h}{dPQ_{1(nbr)}} \\
\vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
\frac{h}{dPQ_{n1}} & \cdots & \frac{h}{dPQ_{n(nbr)}} & \frac{h}{dPQ_{n1}} & \cdots & \frac{h}{dPQ_{n(nbr)}}
\end{array}
\end{array}
\quad dh = \quad (3.21)$$

Sedangkan untuk dua kondisi maka ukuran matrik **dh** adalah :
 $[\{2(nb+ng)\} : \{2*nb\}]$, , maka matrik tersebut dimodifikasi menjadi :

$$dh = \begin{bmatrix} dh_o & 0 \\ 0 & dh_c \end{bmatrix}$$

Dimana:

dh_o = matrik **dh** saat keadaan awal (*operating point*)

dh_c = matrik **dh** saat kondisi kedua (beban naik (1+λ) beban awal)

3.2.3.6 Pembentukan Vektor lb dan ub yang Menyatakan Batas Atas dan Bawah dari Variabel yang dioptimasi

Variable *x* merupakan variable yang dioptimasi yang terdiri dari sudut tegangan, magnitude tegangan, daya aktif, dan daya reaktif.

$$lb \leq x \leq ub \quad (3.22)$$

Ukuran matrik *lb* dan *ub* adalah : $[2(nb+ng):1]$, dengan *ng* adalah jumlah generator dan *nb* adalah jumlah bus, misal sistem dengan 2

generator ($ng = 2$) dan dua bus ($nb = 3$). Maka batas atas dan batas bawah dari permasalahan *optimal power flow* tersebut masing masing ditunjukkan pada persamaan berikut :

$$\mathbf{ub} = \begin{bmatrix} \theta_1 max \\ \theta_2 max \\ \theta_3 max \\ v_1 max \\ v_2 max \\ v_3 max \\ P_{g1} max \\ P_{g2} max \\ Q_{g1} max \\ Q_{g2} max \end{bmatrix} \quad \mathbf{lb} = \begin{bmatrix} \theta_1 min \\ \theta_2 min \\ \theta_3 min \\ v_1 min \\ v_2 min \\ v_3 min \\ P_{g1} min \\ P_{g2} min \\ Q_{g1} min \\ Q_{g2} min \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Sedangkan untuk dua kondisi maka ukuran matriks \mathbf{ub} dan \mathbf{lb} dimodifikasi menjadi persamaan berikut:

$$\begin{array}{ccc}
\begin{array}{c}
\mathbf{ub} = \left[\begin{array}{c}
\theta_1 max_1 \\
\theta_2 max_1 \\
\theta_3 max_1 \\
v_1 max_1 \\
v_2 max_1 \\
v_3 max_1 \\
P_{g1} max_1 \\
P_{g2} max_1 \\
Q_{g1} max_1 \\
Q_{g2} max_1 \\
\vdots \\
\theta_1 max_c \\
\theta_2 max_c \\
\theta_3 max_c \\
v_1 max_c \\
v_2 max_c \\
v_3 max_c \\
P_{g1} max_c \\
P_{g2} max_c \\
Q_{g1} max_c \\
Q_{g2} max_c
\end{array} \right]
\end{array}
&
\begin{array}{c}
\left. \vphantom{\begin{array}{c} \theta_1 max_1 \\ \theta_2 max_1 \\ \theta_3 max_1 \\ v_1 max_1 \\ v_2 max_1 \\ v_3 max_1 \\ P_{g1} max_1 \\ P_{g2} max_1 \\ Q_{g1} max_1 \\ Q_{g2} max_1 \end{array}} \right\} \text{ kondisi 1} \\
\left. \vphantom{\begin{array}{c} \theta_1 max_c \\ \theta_2 max_c \\ \theta_3 max_c \\ v_1 max_c \\ v_2 max_c \\ v_3 max_c \\ P_{g1} max_c \\ P_{g2} max_c \\ Q_{g1} max_c \\ Q_{g2} max_c \end{array}} \right\} \text{ kondisi 2}
\end{array}
&
\begin{array}{c}
\mathbf{lb} = \left[\begin{array}{c}
\theta_1 min_1 \\
\theta_2 min_1 \\
\theta_3 min_1 \\
v_1 min_1 \\
v_2 min_1 \\
v_3 min_1 \\
P_{g1} min_1 \\
P_{g2} min_1 \\
Q_{g1} min_1 \\
Q_{g2} min_1 \\
\vdots \\
\theta_1 min_c \\
\theta_2 min_c \\
\theta_3 min_c \\
v_1 min_c \\
v_2 min_c \\
v_3 min_c \\
P_{g1} min_c \\
P_{g2} min_c \\
Q_{g1} min_c \\
Q_{g2} min_c
\end{array} \right]
\end{array}
&
\begin{array}{c}
\left. \vphantom{\begin{array}{c} \theta_1 min_1 \\ \theta_2 min_1 \\ \theta_3 min_1 \\ v_1 min_1 \\ v_2 min_1 \\ v_3 min_1 \\ P_{g1} min_1 \\ P_{g2} min_1 \\ Q_{g1} min_1 \\ Q_{g2} min_1 \end{array}} \right\} \text{ Kondisi 1} \\
\left. \vphantom{\begin{array}{c} \theta_1 min_c \\ \theta_2 min_c \\ \theta_3 min_c \\ v_1 min_c \\ v_2 min_c \\ v_3 min_c \\ P_{g1} min_c \\ P_{g2} min_c \\ Q_{g1} min_c \\ Q_{g2} min_c \end{array}} \right\} \text{ Kondisi 2}
\end{array}
\end{array}$$

BAB IV

SIMULASI DAN ANALISIS

Pada pengerjaan tugas akhir ini untuk menghitung aliran daya optimal atau *optimal power flow (OPF)* digunakan program *MATLAB* dan simulasi *Matpower* yang telah dimodifikasi sesuai dengan kebutuhan pengerjaan tugas akhir. Simulasi yang dilakukan menggunakan Sistem IEEE 14 bus, Sistem IEEE 30 bus dan juga Sistem 25 bus Jawabali yang telah dimodifikasi. *OPF* dihitung pada dua kondisi sekaligus yaitu saat kondisi awal dimana beban awal sudah ditentukan kemudian untuk kondisi kedua dimana beban diperbesar $(1 + \lambda)$ dari beban awal.

4.1 Sistem IEEE 14 Bus

Program aliran daya optimal, yang selanjutnya disebut *optimal power flow (OPF)* menggunakan *sequential quadratic programming* yang telah dibuat berdasarkan penjelasan serta alur sesuai dengan bab sebelumnya. Dikarenakan perhitungan *optimal power flow* pada tugas akhir ini mempertimbangkan kestabilan tegangan dan penggunaan *static var compensator*, maka perhitungan *OPF* dilakukan dalam dua kondisi sekaligus yaitu saat kondisi awal dimana beban awal sudah ditentukan kemudian dan kondisi kedua dimana beban dinaikkan sesuai dengan *load margin*.

$$P_{Dc} = (1 + \lambda) \times P_{Do}$$

Dimana:

P_{Do} = beban saat kondisi awal

P_{Dc} = beban saat kondisi kedua

λ = *Load Margin*

Load margin adalah suatu ukuran atau jarak kedekatan fundamental suatu sistem terhadap *voltage collapse*[2]. $\lambda_{\max} = 0,2$ berarti sistem dapat menanggung maksimal peningkatan beban sebesar 20% dari beban awal[9]. Sehingga bisa dikatakan apabila sistem memiliki *load margin* yang lebih besar berarti sistem tersebut memiliki kestabilan tegangan yang lebih baik. Sedangkan untuk mengetahui pengaruh dan manfaat dari penggunaan *static var compensator* pada sistem tenaga listrik. Maka ditambahkan *SVC* pada beberapa bus di sistem IEEE 14

bus. Total beban awal sistem IEEE 14 bus adalah 259 MW dan 73.5 MVar. Data yang digunakan untuk simulasi sistem IEEE 14 bus dapat dilihat selengkapnya dilampiran.

4.1.1 Pengujian Tahap 1 Sistem IEEE 14 bus

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh penggunaan *static var compensator* terhadap *load margin* (λ) atau terhadap peningkatan beban. Pengujian ini dilakukan di *matpower* untuk menghitung *OPF* pada pada sistem IEEE 14 bus yang telah dimodifikasi. pengujian ini dilakukan 3 kali. pertama tanpa *SVC*, kedua dengan satu *SVC* dan ketiga dengan 2 *SVC*. Pada pengujian ini akan terlihat pengaruh *SVC* terhadap *maximum load margin* Sistem IEEE 14 bus.

Tabel 4.1 Penempatan SVC pada Sistem IEEE 14 bus

Pengujian	SVC	Bus	Kapasitas (MVar)
P1	-	-	-
P2	1 SVC	10	10
P3	2 SVC	10&13	10&10

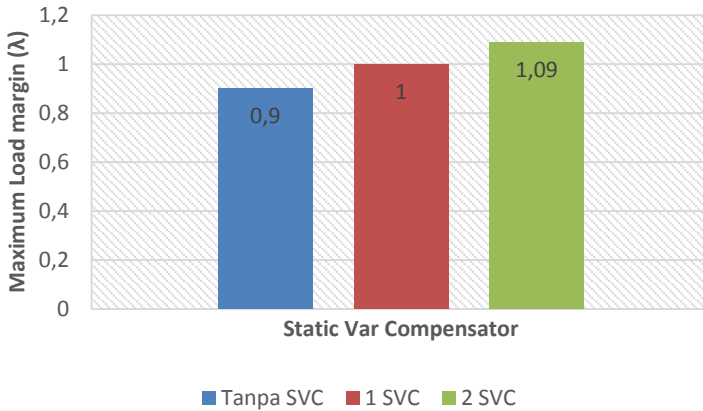
Tabel 4.2 Data hasil simulasi pengujian tahap 1 pada Sistem IEEE 14 bus

Pengujian	P1	P2	P3
SVC	-	1 SVC	2 SVC
Load margin max	0,9	1	1,09
Peningkatan Maksimal Beban	90%	100%	109%

4.1.1.1 Analisa Pengujian Tahap 1 Sistem IEEE 14 bus

Berdasarkan data hasil simulasi pengujian tahap 1. Bisa terlihat bahwa semakin banyak penggunaan *static var compensator* pada suatu sistem tenaga listrik dapat membuat maksimum *load margin* sistem semakin besar. Ini dikarenakan adanya injeksi var dari *SVC* sehingga mengkoreksi power faktor sistem menjadi semakin baik sehingga rugi2 daya berkurang dan penyaluran energi listrik lebih efisien. Dengan bertambahnya *load margin* sistem Berarti bahwa sistem tersebut

semakin bisa menanggulangi peningkatan beban dan juga sistem semakin stabil, dikarenakan jarak terhadap *voltage collapse* semakin jauh.



Gambar 4.1 Pengaruh SVC terhadap λ pada Sistem IEEE 14 bus

Bisa dilihat pada Gambar 4.1 dimana saat tidak ada penambahan *static var compensator* maksimum *load margin* adalah 0,9. Itu berarti bahwa sistem hanya mampu menahan maksimum peningkatan beban sebesar:

$$\begin{aligned} \text{peningkatan beban (\%)} &= (\lambda) \times 100\% = (0,9) \times 100\% \\ &= 90 \% \text{ dari beban awal.} \end{aligned}$$

Dan untuk sistem dengan penambahan satu *SVC* di bus 10, maksimum *load margin* yaitu 1 berarti maksimum peningkatan beban yang dapat ditanggung sistem adalah:

$$\begin{aligned} \text{peningkatan beban (\%)} &= (\lambda) \times 100\% = (1) \times 100\% \\ &= 100 \% \end{aligned}$$

Beban maksimal yang dapat ditanggung Sistem IEEE 14 bus dengan *SVC* di bus 10 adalah duakali beban awal. Atau 100 % lebih dari saat tidak menggunakan *SVC*. Bila menggunakan dua *SVC* maka

maksimum *load margin* menjadi 1,09 atau sistem dapat menanggung maksimum peningkatan beban sebesar 109% dari beban awal atau 19 % lebih banyak dari pada saat tidak menggunakan *SVC*. Maka bisa dilihat dari hasil simulasi pengujian tahap 1 bahwa penggunaan *SVC* dapat membantu sistem dalam meningkatkan maksimum *load margin* sistem. Yang berarti menjauhkan sistem dari *Volatge collapse*. Dan juga membuat sistem dapat menanggulangi peningkatan beban yang berlebih tanpa harus menambahkan pembangkit tambahan, selama peningkatan beban tersebut tidak melebihi maksimum *load margin*. Semakin besar nilai *load margin* berarti sistem bisa dikatakan lebih stabil.

4.1.2 Pengujian Tahap 2 Sistem IEEE 14 bus

Pengujian tahap 2 adalah pengujian pengaruh penggunaan *static var compensator* terhadap biaya optimal pembangkitan tenaga listrik pada suatu sistem tenaga listrik atau bisa dikatakan pengaruh *SVC* terhadap fungsi objektif dari perhitungan *OPF*.

Pengujian ini dilakukan pada sistem IEEE 14 bus yang dimodifikasi dengan *load margin* (λ) = 0,8 atau beban sebesar 466.2 MW dan 132.3 MVar. Pengujian dilakukan tiga kali yaitu saat tanpa *SVC*, dengan satu *SVC* di bus 10 dan yang terakhir dengan dua *SVC* di bus 10 dan 13. Hasil pengujian tahap 2 ini dituliskan pada tabel 4.3 berikut:

Tabel 4.3 Data hasil pengujian tahap 2 Sistem IEEE 14 bus

Pengujian		P1	P2	P3
BUS	SVC	tanpa SVC	1 SVC	2 SVC
1	Pg	207,32	2,0795	208,09
2		39,62	39,6	39,56
3		100	100	100
6		54,5	0,5119	48,71
8		76,51	0,7888	81,06
10	SVC	0	0	0
13		0	0	0
1	Qg	9,15	0	0

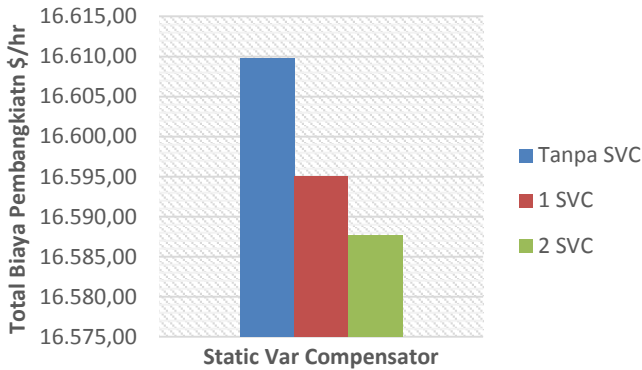
Tabel 4.4 Data hasil pengujian tahap 2 Sistem IEEE 14 bus (Lanjutan)

Pengujian		P1	P2	P3
BUS	SVC	tanpa SVC	1 SVC	2 SVC
2	Qg	50	46,65	39,83
3		40	40	40
6		24	24	22,09
8		24	24	22,12
10	SVC	0	10	10
13		0	0	10
Total Pg		477,95	477,62	477,42
Total Qg		147,15	134,65	124,04
Total Loss P		11,762	11,42	11,219
Total Loss Q		57,41	56,09	55,86
Biaya \$/hr		16.609,81	16.594,98	16.587,67

4.1.2.1 Analisis Pengujian Tahap 2 Sistem IEEE 14 bus

Berdasarkan data pengujian tahap dua bisa dilihat bahwa penggunaan *SVC* dapat menurunkan biaya pembangkitan yang berarti menurunkan biaya operasi sistem tenaga listrik. Biaya operasi sistem tenaga listrik turun dikarenakan adanya injeksi var tambahan oleh *SVC* sehingga var yang harus diinjeksikan generator berkurang dan juga dengan adanya *SVC* di beberapa bus beban, injeksi var oleh *SVC* mengoreksi power faktor sistem sehingga mengurangi rugi2 daya dan membuat sistem lebih efisien.

Pada Gambar 4.2 terlihat untuk sistem dengan *load margin* yang sama yaitu 0,8 atau beban sebesar 180% dari beban awal yaitu 466.2 MW dan 132.3 MVar. Bila tanpa menggunakan *SVC*, total biaya optimum untuk pembangkitan pada sistem IEEE 14 bus adalah 16.609,8082 \$/hr. Bila ditambahkan satu *SVC* pada sistem di bus 10 dengan kapasitas maksimum 10 Mvar total biaya pembangkitan menjadi 16.594,9831 \$/hr.



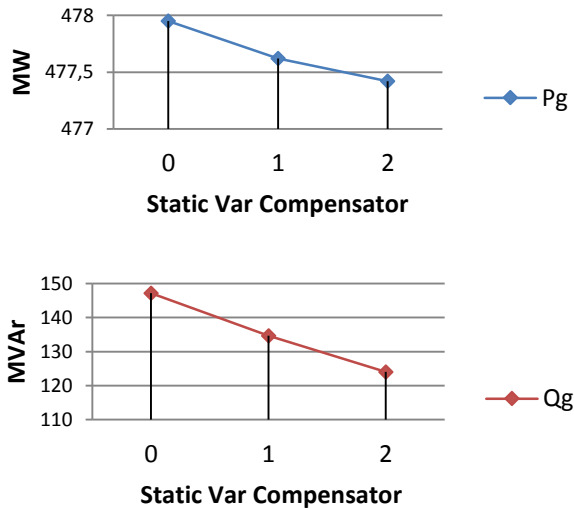
Gambar 4.2 Pengaruh SVC Pada Biaya pada Sistem IEEE 14 dengan $\lambda_{\max}=0,8$

Berarti dapat menghemat biaya pembangkitan sebesar:

$$\begin{aligned}
 \text{Penghematan Biaya} &= \text{Biaya tanpa SVC} - \text{biaya dengan SVC} \\
 &= 16.609,8082 \text{ \$/hr} - 16.594,9831 \text{ \$/hr} \\
 &= 14,8251 \text{ \$/hr}
 \end{aligned}$$

Bila ditambahkan dua *SVC* pada sistem di bus 10 dan 13 dengan kapasitas yang sama yaitu 10 MVar. Maka total biaya pembangkitan optimum sistem menjadi 16.587,6699 \$/hr. Yang berarti menghemat biaya pembangkitan sebesar 22,1383 \$/hr. Jadi bisa dilihat bahwa penggunaan *static var compensator* dapat menurunkan biaya pembangkitan pada sistem tenaga listrik.

Pada pengujian tahap kedua ini, terlihat bahwa dengan penambahan *SVC*, jumlah injeksi daya oleh generator juga menurun, baik daya aktif (MW) ataupun daya reaktif (MVar). Penurunan daya injeksi generator disebabkan oleh losses yang menurun dikarenakan kompensasi var oleh *SVC*.



Gambar 4.3 Pengaruh *SVC* terhadap P & Q generator pada Sistem IEEE 14 bus

4.2 Sistem IEEE 30 Bus

Data yang digunakan untuk simulasi Sistem IEEE 30 bus dapat dilihat pada lampiran.

4.2.1 Pengujian Tahap 1 Sistem IEEE 30 bus

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh penggunaan *static var compensator* terhadap *load margin* atau terhadap peningkatan beban. Pengujian ini dilakukan pada perhitungan OPF pada *matpower* pada sistem IEEE 30 bus yang telah dimodifikasi. Pengujian dilakukan lima kali. Pengujian pertama tanpa SVC, kedua dengan satu SVC di bus 4, ketiga dengan dua SVC di bus 4 dan 17, keempat dengan tiga SVC di bus 4, 17 dan 19, dan pengujian terakhir dengan SVC pada bus 4, 17, 19 dan 30. Pada pengujian ini akan terlihat pengaruh *SVC* terhadap maksimum *load margin* pada sistem IEEE 30 bus. Hasil pengujian tahap 1 ini dituliskan pada tabel 4.6 berikut:

Tabel 4.5 Penempatan SVC di Sistem IEEE 30 bus

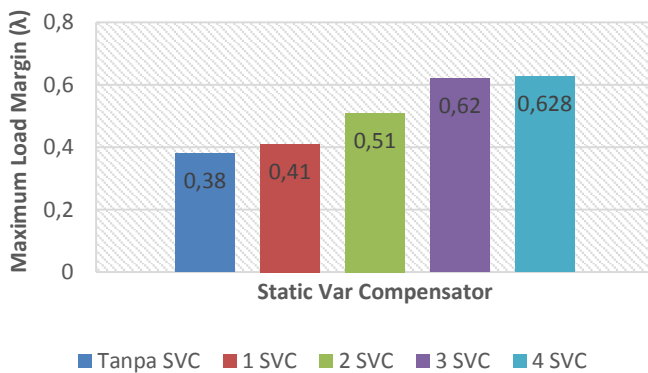
Pengujian	SVC	Bus	Kapasitas Masing2 (MVar)	Kapasitas Total (MVar)
P1	-	-	-	-
P2	1 SVC	4	25	25
P3	2 SVC	4 & 17	25	50
P4	3 SVC	4, 17 & 19	25	75
P5	4 SVC	4, 17,19 &30	25	100

Tabel 4.6 Data hasil simulasi pengujian tahap 1 Sistem IEEE 30 bus

Pengujian	P1	P2	P3	P4	P5
Dengan	-	1 SVC	2 SVC	3 SVC	4 SVC
Load Margin Maximum	0,38	0,41	0,51	0,62	0,628
Peningkatan Maksimal Beban	38%	41%	51%	62%	628%

4.2.1.1 Analisa Pengujian Tahap 1 Sistem IEEE 30 bus

Berdasarkan data hasil simulasi pengujian tahap 1 bisa terlihat bahwa semakin banyak penggunaan *static var compensator* pada suatu sistem Sistem IEEE 30 bus membuat maksimum *load margin* sistem semakin besar.

**Gambar 4.4** Pengaruh SVC terhadap λ pada Sistem IEEE 30 Bus

Bisa dilihat pada Gambar 4.4 dimana saat tidak ada penambahan *static var compensator* maksimum load margin adalah 0,38. Itu berarti bahwa sistem hanya mampu menahan peningkatan beban sebesar:

$$\begin{aligned} \text{peningkatan beban (\%)} &= (\lambda) \times 100\% = (0,38) \times 100\% \\ &= 38 \% \text{ dari beban awal.} \end{aligned}$$

berarti beban maksimum yang dapat ditanggung sistem adalah 261,10 MW dan 200,24 MVar. Untuk pengujian kedua, maksimum *load margin* yaitu 0,41 atau sistem dapat menanggung peningkatan beban sebesar 41 % dari beban awal yang berarti beban maksimum yang dapat ditanggung sistem menjadi 266.77 MW dan 204.59 MVar. Pada pengujian ketiga beban maksimum yang dapat ditanggung sistem adalah 285.69 MW dan 219.10 MVar. Pengujian keempat dengan penambahan tiga SVC, beban maksimum yang dapat ditanggung sistem adalah 306.50 MW dan 235.06 MVar. Pada pengujian kelima dengan penambahan empat SVC, beban maksimum yang dapat ditanggung sistem menjadi 308.02 MW dan 236.22 MVar. Bila dilihat dari trend kenaikan load margin terhadap penambahan *SVC*, untuk pengujian pertama sampai ketiga kenaikan maksimum *load margin* sistem stabil yaitu sekitar 0,1 namun pada pengujian kelima dengan penambahan *SVC* di bus 30 yang berkapasitas sama yaitu 25 MVar. Kenaikan maksimum load margin menjadi turun drastis yaitu sekitar 0,008. Ini berarti tidak selamanya penambahan *SVC* pada suatu sistem tenaga listrik dapat menaikkan maksimum *load margin* sistem. Apabila kenaikan load margin sudah mencapai batas, penambahan *SVC* tidak lagi akan menambah load margin dari suatu sistem tenaga listrik, dalam kasus ini adalah Sistem IEEE 30 bus.

Maka bisa dilihat dari hasil simulasi pengujian tahap 1 bahwa penggunaan *SVC* dapat membantu sistem dalam meningkatkan maksimum *load margin* sistem, yang berarti menjauhkan sistem dari *Voltage collapse*. Sehingga sistem bisa dikatakan lebih stabil Dan juga membuat sistem dapat menanggulangi peningkatan beban yang berlebih tanpa harus menambahkan pembangkit tambahan. Namun tidak selamanya penambahan *SVC* dapat meningkatkan load margin sistem. Ada titik tertentu dimana penambahan *SVC* tidak lagi meningkatkan *load margin* (beban maksimum yang dapat ditanggung sistem).

4.2.2 Pengujian Tahap 2 Sistem IEEE 30 bus

Pengujian tahap 2 adalah pengujian pengaruh penggunaan *static var compensator* terhadap biaya optimal pembangkitan tenaga listrik pada suatu sistem tenaga listrik atau bisa dikatakan pengaruh *SVC* terhadap fungsi objektif dari perhitungan *OPF*.

Pengujian ini dilakukan pada sistem IEEE 30 bus yang dimodifikasi dengan *load margin* (λ) = 0,3 atau beban naik 30% dari total beban awal, menjadi sebesar 245,96 MW dan 188,63MVar. Pengujian dilakukan lima kali yaitu: Pengujian pertama tanpa SVC, kedua dengan satu SVC di bus 4, ketiga dengan dua SVC di bus 4 dan 17, keempat dengan tiga SVC di bus 4,17 dan 19, dan pengujian terakhir dengan SVC pada bus 4,17,19 dan 30. Pada pengujian ini akan terlihat pengaruh *SVC* terhadap biaya pembangkitan hasil perhitungan OPF pada sistem IEEE 30 bus. Hasil pengujian tahap 1 ini dituliskan pada tabel 4.8 dan 4.9 berikut:

Tabel 4.7 Penempatan SVC di Sistem IEEE 30 bus

Pengujian	SVC	Bus	Kapasitas Masing2 (MVar)	Kapasitas Total (MVar)
P1	-	-	-	-
P2	1 SVC	4	25	25
P3	2 SVC	4 & 17	25	50
P4	3 SVC	4, 17 & 19	25	75
P5	4 SVC	4, 17,19 &30	25	100

Tabel 4.8 Data hasil pengujian tahap 2 Sistem IEEE 30 bus

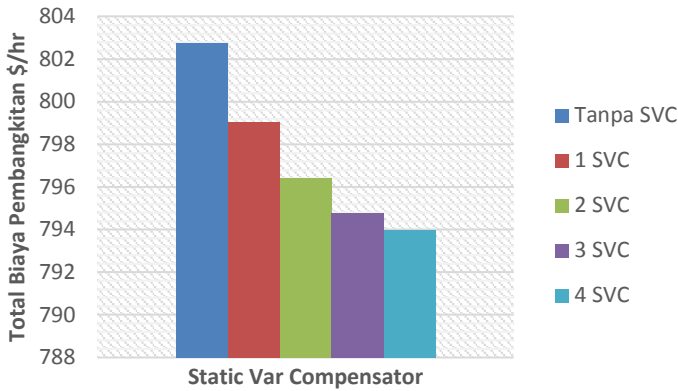
Pengujian		P1	P2	P3	P4	P5
Bus	SVC	-	1 SVC	2 SVC	3 SVC	4 SVC
1	Pg	55,75	53,7	53,03	52,91	52,88
2		73,05	69,74	68,82	68,66	68,63
4	SVC	0	0	0	0	0
13	Pg	24,77	26,26	26,59	26,51	26,48
17	SVC	0	0	0	0	0
19		0	0	0	0	0

Tabel 4.9 Data hasil pengujian tahap 2 Sistem IEEE 30 bus (Lanjutan)

Pengujian		P1	P2	P3	P4	P5
Bus	SVC	-	1 SVC	2 SVC	3 SVC	4 SVC
22	Pg	20,74	24,53	25,83	25,98	25,98
23		25,92	27,17	26,75	26,72	26,75
27		51,37	49,74	49,45	49,27	49,14
30	SVC	0	0	0	0	0
1	Qg	9,01	-1,86	-5,25	-4,15	-3,92
2		60	60	39,75	35,33	35,48
4	SVC	0	25	25	25	25
13	Qg	44,7	44,7	38,79	27,73	27,86
17	SVC	0	0	25	21,29	21,37
19		0	0	0	21,02	21,02
22	Qg	24,41	24,43	27,88	24,73	24,88
23		11,66	10,07	8,82	8,33	8,52
27		42,7	27,8	27,47	26,51	15,22
30	SVC	0	0	0	0	10
Total Pg		251,6	251,14	250,47	250,05	249,86
Total Qg		192,48	165,14	137,46	118,48	108,04
Total Loss P		5,652	5,184	4,494	4,092	3,903
Total Loss Q		20,86	18,66	16,2	14,53	14,17
Biaya (\$/hr)		802,7622	799,072	796,4017	794,757	793,97

4.2.2.1 Analisis Pengujian Tahap 2 Sistem IEEE 30 bus

Berdasarkan data pengujian tahap dua bisa dilihat bahwa penggunaan *SVC* dapat menurunkan biaya pembangkitan yang berarti menurunkan biaya operasi sistem tenaga listrik.

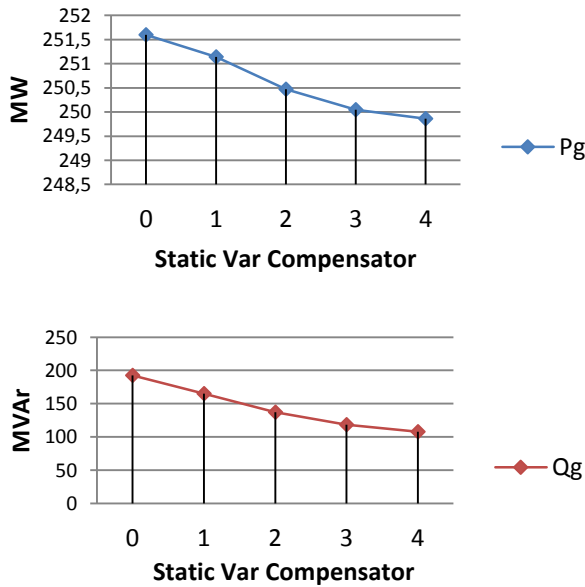


Gambar 4.5 Pengaruh SVC pada biaya pembangkitan Sistem IEEE 30 bus dengan $\lambda = 0,3$

Pada Gambar 4.5 diatas terlihat untuk sistem dengan *load margin* yang sama yaitu 0,3 atau beban total sebesar 245,96 MW dan 188,63 MVar. Bila tanpa menggunakan *SVC*, total biaya optimum untuk pembangkitan pada sistem IEEE 30 bus adalah 802,7622 \$/hr. Bila ditambahkan satu *SVC* pada sistem di bus 4 dengan kapasitas maksimum 25 MVar total biaya pembangkitan menjadi 799,072 \$/hr. Berarti dapat menghemat biaya pembangkitan sebesar:

$$\begin{aligned}
 \text{Penghematan Biaya} &= \text{Biaya tanpa SVC} - \text{biaya dengan SVC} \\
 &= 802,7622 \text{ $/hr} - 799,072 \text{ $/hr} \\
 &= 3,6903 \text{ $/hr}
 \end{aligned}$$

Bila ditambahkan dua *SVC* pada sistem di bus 4 dan 17 dengan kapasitas yang sama yaitu 25 MVar. Maka total biaya pembangkitan optimum sistem menjadi 796,4017 \$/hr. Yang berarti menghemat biaya pembangkitan sebesar 6,3605 \$/hr. Dan bila ditambah *SVC* lagi di bus 19, biaya pembangkitan menjadi 794,757 \$/hr. dan bila ditambah lagi *SVC* di bus 30 dengan kapasitas yang sama, biaya pembangkitan menjadi 793,970 \$/hr. Jadi bisa dilihat bahwa penggunaan *static var compensator* dapat menurunkan biaya pembangkitan pada sistem tenaga listrik.



Gambar 4.6 Pengaruh *SVC* pada P dan Q generator pada Sistem IEEE 30 bus

Pada pengujian tahap kedua ini, terlihat bahwa dengan penambahan *SVC*, jumlah injeksi daya pada generator menurun, baik daya aktif (MW) ataupun daya reaktif (MVar). Penurunan injeksi daya generator disebabkan karena penurunan loss sistem. Dikarenakan *SVC* adalah kompensator daya reaktif. Maka dengan pemasangan *SVC* loss sistem menjadi turun.

4.3 Sistem Jawabali

Data yang digunakan untuk simulasi Sistem 25 bus Jawabali dapat dilihat pada lampiran.

4.3.1 Pengujian Tahap 1 Sistem 25 Bus Jawabali

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh penggunaan *static var compensator* terhadap *load margin* atau terhadap peningkatan beban. Pengujian ini dilakukan pada perhitungan *OPF* pada matpower

pada sistem jawabali yang telah dimodifikasi. Pengujian dilakukan lima kali. Pengujian pertama tanpa *SVC*, kedua dengan satu *SVC* di bus 5, ketiga dengan dua *SVC* di bus 5 dan 14, keempat dengan tiga *SVC* di bus 5, 14 dan 20, dan pengujian terakhir dengan *SVC* pada bus 5, 14, 20 dan 25. Pada pengujian ini akan terlihat pengaruh *SVC* terhadap maksimum *load margin* pada Sistem 25 bus Jawabali. Hasil pengujian tahap 1 ini dituliskan pada tabel 4.11 berikut:

Tabel 4.10 Penempatan *SVC* pada sistem Jawabali

Pengujian	SVC	Bus	Kapasitas Masing2 (MVar)	Kapasitas Total (MVar)
P1	-	-	-	-
P2	1 SVC	5	150	150
P3	2 SVC	5 & 14	150	300
P4	3 SVC	5, 14 & 20	150	450
P5	4 SVC	5, 14,20 &25	150	600

Tabel 4.11 Data hasil simulasi pengujian tahap 1 Sistem Jawabali

Pengujian	P1	P2	P3	P4	P5
Dengan	-	1 SVC	2 SVC	3 SVC	4 SVC
Load Margin Max	0,45	0,47	0,48	0,49	0,5
Peningkatan Maksimal Beban	45%	47%	48%	49%	50%
Pg	14068,85	14272,6	14375,64	14473,6	14570,8
Qg	8210,43	8423,54	8540,11	8604,60	8633,99

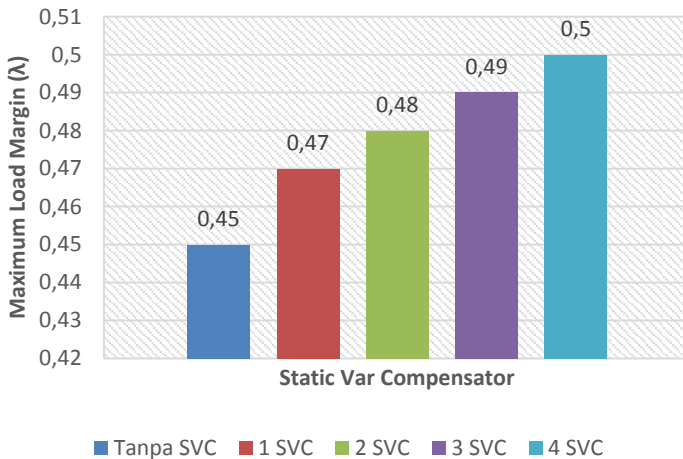
4.3.1.1 Analisa Pengujian Tahap 1 Sistem Jawabali

Berdasarkan data hasil simulasi pengujian tahap 1 bisa terlihat bahwa semakin banyak penggunaan *static var compensator* pada suatu sistem tenaga listrik membuat sistem tersebut semakin bisa menanggulangi peningkatan beban.

Bisa dilihat pada Tabel 4.11 dimana pada pengujian pertama, saat tidak ada penambahan *static var compensator* maksimum load margin

adalah 0,45. Itu berarti bahwa sistem hanya mampu menahan peningkatan beban sekitar:

$$\begin{aligned} \text{peningkatan beban } (\%) &= (\lambda) \times 100\% = (0,45) \times 100\% \\ &= 45 \% \text{ dari beban awal} \end{aligned}$$



Gambar 4.7 Pengaruh *SVC* terhadap *load margin* pada Sistem Jawabali

berarti beban maksimum yang dapat ditanggung sistem adalah 13764,85 MW dan 5069,20 MVar. Dan pada pengujian kedua sistem dengan penambahan satu *SVC*, maksimum *load margin* yaitu 0,47 berarti sistem dapat menanggung peningkatan beban sebesar 47%, berarti beban maksimum yang dapat ditanggung sistem adalah 13954,71 MW dan 5139,12 MVar. Pada pengujian ketiga dengan penambahan dua *SVC* maka maksimum *load margin* menjadi 0,48 atau sistem dapat menanggung peningkatan beban sebesar 48 % dari beban awal, sekitar 14049,64 MW dan 5174,08 MVar. Pada percobaan keempat menggunakan tiga *SVC*, maksimum *load margin* adalah 0,49 dan pada percobaan kelima menggunakan empat *SVC*, maksimum *load margin* adalah 0,5. Bila dilihat dari *trend* kenaikan *load margin* terhadap penambahan *SVC*.

Maka bisa dilihat dari hasil simulasi pengujian tahap 1 bahwa penggunaan *SVC* dapat membantu sistem dalam meningkatkan

maksimum *load margin* sistem. Yang berarti menjauhkan sistem dari *Volatge collapse*. Sehingga sistem bisa dikatakan lebih stabil. Dan juga membuat sistem dapat menanggulangi peningkatan beban yang berlebih tanpa harus menambahkan pembangkit tambahan. Dengan syarat selama peningkatan beban tersebut tidak melebihi maksimum *load margin*. Namun tidak selamanya penambahan Var dapat meningkatkan *load margin* (peningkatan beban). Ada saat dimana penambahan *SVC* tidak lagi meningkatkan *load margin*. yaitu ketika beban sudah mendekati kapasitas maksimum pembangkitan.

4.3.2 Pengujian Tahap 2 Sistem 25 Bus Jawabali

Pengujian tahap 2 ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari penggunaan static var compensator terhadap biaya optimal pembangkitan tenaga listrik pada suatu sistem tenaga listrik dalam hal ini adalah sistem Jawabali atau bisa dikatakan pengaruh *SVC* terhadap fungsi objektif dari perhitungan *OPF*.

Pengujian ini dilakukan pada sistem 25 bus Jawabali yang dimodifikasi dengan *load margin* (λ) = 0,4. Beban sebesar 13290,20 MW dan 4894,40 MVar. Pengujian dilakukan lima kali yaitu: Pengujian pertama tanpa *SVC*, kedua dengan satu *SVC* di bus 5, ketiga dengan dua *SVC* di bus 5 dan 14, keempat dengan tiga *SVC* di bus 5,14 dan 20, dan pengujian terakhir dengan *SVC* pada bus 5,14,20 dan 25. Pada pengujian ini akan terlihat pengaruh *SVC* terhadap biaya pembangkitan hasil perhitungan *OPF* pada Sistem 25 Bus Jawabali.. Hasil pengujian tahap 2 ini dituliskan pada tabel 4.13 dan 4.14 berikut:

Tabel 4.12 Penempatan *SVC* pada Sistem 25 bus Jawabali

Pengujian	SVC	Bus	Kapasitas Masing2 (MVar)	Kapasitas Total (MVar)
P1	-	-	-	-
P2	1 SVC	5	150	150
P3	2 SVC	5 & 14	150	300
P4	3 SVC	5, 14 & 20	150	450
P5	4 SVC	5, 14,20 &25	150	600

Tabel 4.13 Data hasil pengujian Sistem 25 bus Jawabali tahap 2

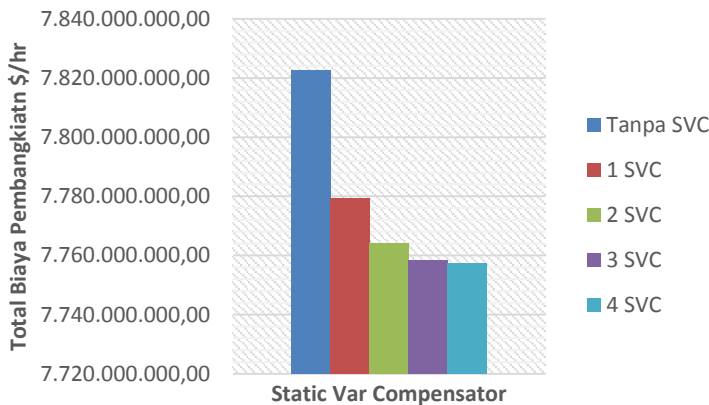
Pengujian		P1	P2	P3	P4	P5
Bus		-	1 SVC	2 SVC	3 SVC	4 SVC
Pg	1	3857	3857	3857	3857	3857
	8	1461	1369,8	1331,2	1315,8	1314,7
	10	700	700	700	700	700
	11	700	700	700	700	700
	15	1316	1316	1316	1316	1316
	17	1653,2	1697,2	1711	1715,9	1715,5
	22	3735	3735	3735	3735	3735
	23	189,2	221,1	231,5	234,9	234,7
Qg	1	2040	2040	2040	2011,7	1994,7
	8	1540	1540	1540	1540	1540
	10	488	488	488	488	488
	11	440	440	440	440	440
	15	480	480	480	480	480
	17	1250	1250	1244,7	1149,5	1026,4
	22	1673,5	1365,8	1072,3	974,5	946
	23	302	302	302	302	302
SVC	5	0	150	150	150	150
	14	0	0	150	150	150
	20	0	0	0	150	150
	25	0	0	0	0	150
Total Pg		13.611,4	13.596,1	13.581,7	13.574,6	13.572,9
Total Qg		8.213,5	7.905,8	7.607	7.385,7	7.217,1
Total loss P		321,203	305,855	291,456	284,482	282,665
Total loss Q		3.319,07	3.161,4	3.012,63	2.941,28	2.922,7

Tabel 4.14 Biaya pebangkitan Jawabali saat load margin = 0,4

SVC	λ	Biaya Pembangkitan \$/hr
0	0,4	7.822.663.383,0827
1	0,4	7.779.357.181,4008
2	0,4	7.764.149.333,5676
3	0,4	7.758.439.943,4659
4	0,4	7.757.294.693,2083

4.3.2.1 Analisis Pengujian Tahap 2 Sistem Jawabali

Berdasarkan data pengujian tahap dua bisa dilihat bahwa penggunaan *SVC* dapat menurunkan biaya pembangkitan yang berarti menurunkan biaya operasi sistem tenaga listrik.



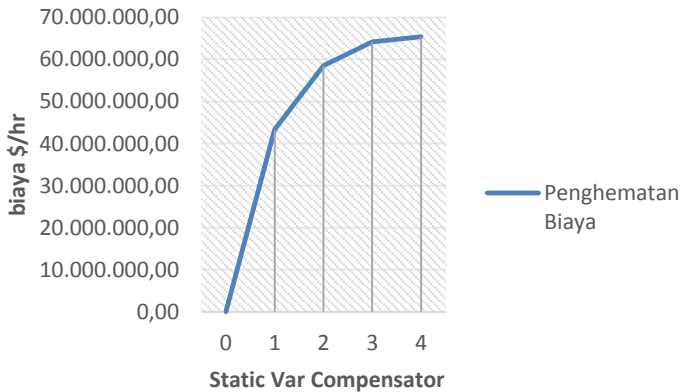
Gambar 4.8 Pengaruh SVC terhadap biaya pembangkitan Pada sistem Jawabali

Pada Gambar 4.8 diatas terlihat untuk sistem dengan *load margin* yang sama yaitu 0,4 atau beban sebesar 140% dari beban awal. Bila tanpa menggunakan *SVC*, total biaya optimum untuk pembangkitan pada Sistem Jawabali adalah 7.822.663.383,0827 \$/hr. Bila ditambahkan satu *SVC* pada sistem di bus 5 dengan kapasitas maksimum

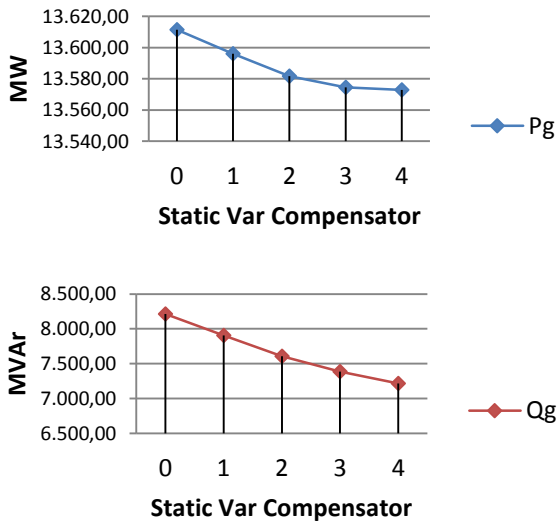
25 Mvar total biaya pembangkitan menjadi 7.779.357.181,4008 \$/hr. Berarti dapat menghemat biaya pembangkitan sebesar:

$$\begin{aligned} \text{Penghematan Biaya} &= \text{Biaya tanpa SVC} - \text{biaya dengan SVC} \\ &= 7.822.663.383 \text{ $/hr} - 7.779.357.181 \text{ $/hr} \\ &= 43.306.202 \text{ $/hr} \end{aligned}$$

Bila ditambahkan dua *SVC* pada sistem di bus 5 dan 14 dengan kapasitas yang sama yaitu 150 MVar. Maka total biaya pembangkitan optimum sistem menjadi 7.764.149.333,5676 \$/hr. Yang berarti menghemat biaya pembangkitan sebesar 58.514.050 \$/hr. Dan bila ditambah satu *SVC* lagi di bus 20 menghemat biaya pembangkitan sebesar 64.22.440 \$/hr. dan bila ditambah lagi *SVC* di bus 25 menjadi 4 *SVC* dengan kapasitas yang sama menghemat biaya pembangkitan sebesar 65.368.690 \$/hr. Jadi bisa dilihat bahwa penggunaan *static var compensator* dapat menurunkan biaya pembangkitan pada sistem tenaga listrik.



Gambar 4.9 Pengaruh SVC terhadap penghematan biaya pembangkitan



Gambar 4.10 Pengaruh SVC terhadap P dan Q generator pada Sistem Jawabali

Pada pengujian tahap kedua ini, terlihat bahwa dengan penambahan *SVC*, jumlah injeksi daya pada generator menurun, baik daya aktif (MW) ataupun daya reaktif (MVar). Penurunan daya reaktif generator lebih besar bila dibandingkan dengan daya aktif. Dikarenakan *SVC* sendiri adalah penghasil daya reaktif.

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi dan analisis diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Dengan pemasangan *static var compensator* pada Sistem IEEE 14 bus *load margin* sistem meningkat dari 0,9 menjadi 1,09. Untuk Sistem IEEE 30 bus dari 0,38 menjadi 0,628. Dan Sistem Jawabali dengan 25 bus dari 0,45 menjadi 0,5. Itu dikarenakan dengan penambahan var maka power faktor sistem menjadi lebih baik. sehingga sistem menjadi lebih efisien. Dengan bertambahnya maximum *load margin* sistem menunjukkan bahwa kestabilan sistem meningkat karena sistem menjauh dari *voltage collapse*.
2. Pemasangan satu *static var compensator* pada Sistem IEEE 14 bus dengan beban sebesar 466.2 MW dan 132.3 MVar dapat menghemat biaya pembangkitan dari sebesar 14,8251 \$/hr. Untuk Sistem IEEE 30 bus dengan beban sebesar 245,96 MW dan 188,63 MVar dapat menghemat biaya pembangkitan sebesar 3,6903 \$/hr. Dan untuk Sistem Jawabali dengan beban sebesar 13.290,20 MW dan 4.894,40 MVar dapat menghemat biaya sebesar 43.306.202 \$/hr.
3. Biaya pembangkitan menurun dikarenakan *SVC* menghasilkan daya reaktif tambahan untuk membantu memenuhi kebutuhan daya reaktif beban, dan juga dikarenakan kompensator var yang memperbaiki power faktor sistem sehingga sistem lebih efisien dan juga.
4. Dengan penambahan *SVC* pada sistem dengan beban tetap membuat total losses sistem menurun.

5.2 Saran

Adapun saran-saran yang dapat diberikan untuk penelitian berikutnya dengan topik yang berkaitan dengan tugas akhir ini antara lain:

1. Untuk penelitian selanjutnya dapat dikembangkan untuk mengoptimalkan pemasangan *SVC* pada sistem tenaga listrik baik letak maupun kapasitas dari *SVC* dengan metode tertentu. Agar

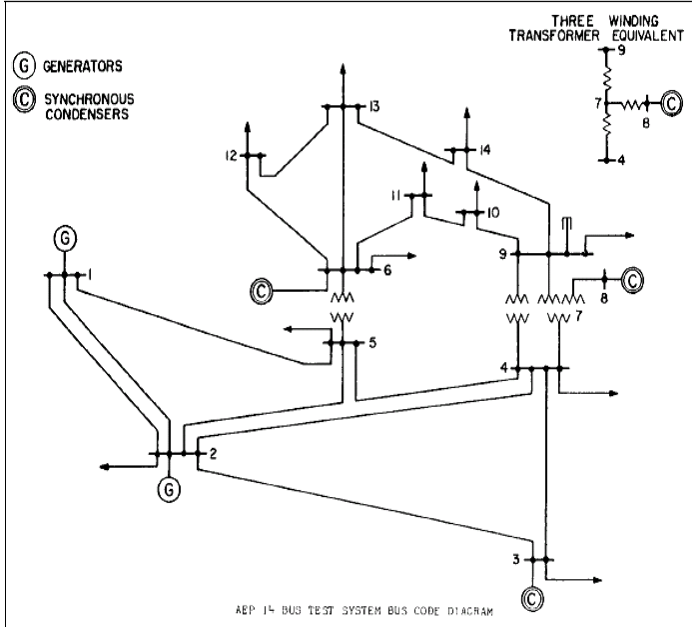
SVC dapat lebih dimanfaatkan secara maksimal pada sistem tenaga listrik.

2. Agar lebih mengetahui manfaat dari pemasangan *SVC* pada sistem yang nyata bisa dilakukan perhitungan dengan *Dynamic optimal power flow* pada real sistem yang ada di daerah anda.

LAMPIRAN

1 Data Sistem IEEE 14 bus

1.1 Gambar Single Line Diagram Standar IEEE 14 bus



1.2 Data cost function sistem IEEE 14 bus

Unit	Bus	<i>Cost function</i>	Daya Aktif		Daya Reaktif	
		(R/MWh)	MW	MW	MVar	MVar
1	1	$0.0430293P_1^2 + 20P_1$	80	0	10	0
2	2	$0.25P_2^2 + 20P_1$	80	0	50	-40
3	13	$0.01P_3^2 + 40P_1$	40	0	40	0
4	22	$0.01P_4^2 + 40P_1$	50	0	24	-6
5	23	$0.01P_5^2 + 40P_1$	30	0	24	-6

1.3 Data beban awal Sistem IEEE 14 bus

BUS	Tipe	Load	
		MW	Mvar
1	3	0	0
2	2	21,7	12,7
3	2	94,2	19
4	1	47,8	-3,9
5	1	7,6	1,6
6	2	11,2	7,5
7	1	0	0
8	2	0	0
9	1	29,5	16,6
10	1	9	5,8
11	1	3,5	1,8
12	1	6,1	1,6
13	1	13,5	5,8
14	1	14,9	5

1.4 Data Saluran Sistem IEEE 14 bus

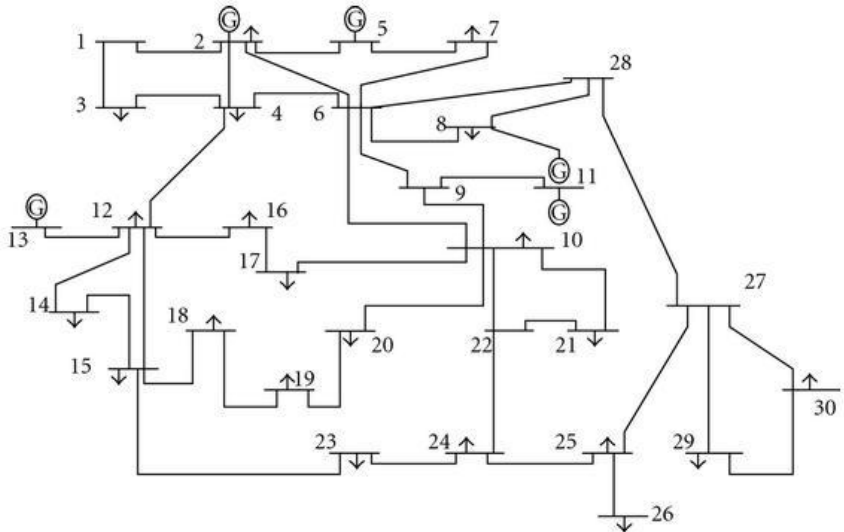
From Bus	To Bus	Resistansi	Reaktansi	Line Charging	Rate (MVA)
1	2	0,01938	0,05917	0,0528	9900
1	5	0,05403	0,22304	0,0492	9900
2	3	0,04699	0,19797	0,0438	9900
2	4	0,05811	0,17632	0,034	9900
2	5	0,05695	0,17388	0,0346	9900
3	4	0,06701	0,17103	0,0128	9900
4	5	0,01335	0,04211	0	9900
4	7	0	0,20912	0	9900

1.5 Data Saluran Sistem IEEE 14 bus (Lanjutan)

From Bus	To Bus	Resistansi	Reaktansi	Line Charging	Rate (MVA)
4	9	0	0,55618	0	9900
5	6	0	0,25202	0	9900
6	11	0,09498	0,1989	0	9900
6	12	0,12291	0,25581	0	9900
6	13	0,06615	0,13027	0	9900
7	8	0	0,17615	0	9900
7	9	0	0,11001	0	9900
9	10	0,03181	0,0845	0	9900
9	14	0,12711	0,27038	0	9900
10	11	0,08205	0,19207	0	9900
12	13	0,22092	0,19988	0	9900
13	14	0,17093	0,34802	0	9900

2 Data Sistem IEEE 30 bus

2.1 Single Line Diagram Standar IEEE 30 bus



2.2 Data cost function sistem IEEE 30 bus

Unit	Bus	Cost function	Daya Aktif		Daya Reaktif	
		(R/MWh)	MW	MW	MVar	MVar
1	1	$0.02P_1^2 + 2P_1$	80	0	150	-20
2	2	$0.0175 + 1.75P_1$	80	0	60	-20
3	13	$0.0625P_1^2 + P_1$	40	0	44,7	-15
4	22	$0.00834P_1^2 + 3.25P_1$	50	0	62,5	-15
5	23	$0.025P_1^2 + 3P_1$	30	0	40	-10
6	27	$0.025P_1^2 + 3P_1$	55	0	48,7	-15

2.3 Data beban awal Sistem IEEE 30 bus

BUS	Tipe	Load	
		MW	Mvar
1	3	0	0
2	2	21,7	20
3	1	2,4	2
4	2	7,6	6,6
5	1	0	0
6	1	0	0
7	2	22,8	10,9
8	1	30	30
9	1	0	0
10	1	5,8	5
11	1	0	0
12	1	11,2	8
13	2	0	0
14	1	6,2	2,6
15	1	8,2	3,5
16	1	3,5	1,8
17	2	9	8,8
18	1	3,2	2,9
19	2	9,5	9,4
20	1	2,2	2
21	1	17,5	11,2
22	2	0	0
23	2	3,2	2,6
24	1	8,7	6,7
25	1	0	0
26	1	3,5	3,3

2.4 Data beban awal Sistem IEEE 30 bus (Lanjutan)

BUS	Tipe	Load	
		MW	Mvar
27	2	0	0
28	1	0	0
29	1	2,4	0,9
30	2	10,6	6,9
Total Beban		189.2	145.1

2.5 Data saluran sistem IEEE 30 bus

From Bus	To Bus	Resistansi	Reaktansi	Line Charging	Rate (MVA)
1	2	0,02	0,06	0,03	130
1	3	0,05	0,19	0,02	130
2	4	0,06	0,17	0,02	65
3	4	0,01	0,04	0	130
2	5	0,05	0,2	0,02	130
2	6	0,06	0,18	0,02	65
4	6	0,01	0,04	0	90
5	7	0,05	0,12	0,01	70
6	7	0,03	0,08	0,01	130
6	8	0,01	0,04	0	60
6	9	0	0,21	0	65
6	10	0	0,56	0	32
9	11	0	0,21	0	65
9	10	0	0,11	0	65
4	12	0	0,26	0	65
12	13	0	0,14	0	65
12	14	0,12	0,26	0	32

2.6 Data saluran sistem IEEE 30 bus (Lanjutan)

From Bus	To Bus	Resistansi	Reaktansi	Line Charging	Rate (MVA)
12	15	0,07	0,13	0	32
12	16	0,09	0,2	0	32
14	15	0,22	0,2	0	16
15	18	0,11	0,22	0	16
18	19	0,06	0,13	0	32
19	20	0,03	0,07	0	40
10	20	0,09	0,21	0	32
10	17	0,03	0,08	0	32
10	21	0,03	0,07	0	32
10	22	0,07	0,15	0	32
21	22	0,01	0,02	0	32
15	23	0,1	0,2	0	16
22	24	0,12	0,18	0	16
23	24	0,13	0,27	0	16
24	25	0,19	0,33	0	30
25	26	0,25	0,38	0	30
25	27	0,11	0,21	0	30
28	27	0	0,4	0	65
27	29	0,22	0,42	0	16
27	30	0,32	0,6	0	16
29	30	0,24	0,45	0	16
8	28	0,06	0,2	0,02	45
6	28	0,02	0,06	0,01	32

3.3 Data cost function Sistem 25 bus Jawabali (Lanjutan)

Unit	Bus	<i>Cost function</i> (R/MWh)	Daya Reaktif		Daya Aktif	
			MVAr	MVAr	MW	MW
7	22	$55.847182P_7^2$ $- 52533.46725P_7$ $+ 432168961.7$	1920	-840	3735	0
8	23	$1979.263861P_8^2$ $- 358778.5066P_8$ $+ 689633384.9$	302	-302	850	0

3.4 Data beban awal Sistem 25 bus Jawabali

BUS	Tipe	Load	
		MW	Mvar
1	3	220	69
2	1	186	243
3	1	254	36
4	1	447	46
5	1	680	358
6	1	566	164
7	1	621	169
8	2	0	0
9	1	994	379
10	2	550	177
11	2	0	0
12	1	666	400
13	1	293	27
14	1	494	200
15	2	0	0
16	1	440	379
17	2	123	-91

3.5 Data beban awal Sistem 25 bus Jawabali (Lanjutan)

BUS	Tipe	Load	
		MW	Mvar
18	1	327	67
19	1	213	73
20	1	530	180
21	1	551	153
22	2	267	50
23	2	111	132
24	1	681	226
25	1	279	59
Total Load		9493	3496


3.6 Data saluran sistem Jawabali

F- Bus	T- Bus	Resistansi	Reaktansi	Line Charging	Rate (MVA)
1	2	0,00062649	0,00700876	0	4800
1	24	0,00367767	0,03533331	0	3960
2	5	0,01313332	0,14692579	0	2400
3	4	0,00151317	0,01692830	0	4800
4	18	0,00069417	0,00666929	0	4800
5	7	0,00444188	0,0426754	0	1980
5	8	0,0062116	0,059678	0	1980
5	11	0,00411138	0,04599504	0	4800
6	8	0,0056256	0,054048	0	1980
8	9	0,00282205	0,02711295	0	3960
9	10	0,00273996	0,02632419	0	3960
10	11	0,00147472	0,01416845	0	3960
11	12	0,0019578	0,0219024	0	4800

3.7 Data saluran sistem Jawabali (Lanjutan)

F- Bus	T- Bus	Resistansi	Reaktansi	Line Charging	Rate (MVA)
12	13	0,00699098	0,0671659	0	3960
13	14	0,013478	0,12949	0	3960
14	15	0,01353392	0,15140736	0	4800
14	16	0,01579856	0,1517848	0	1980
14	20	0,00903612	0,0868146	0	2400
16	17	0,00139468	0,0133994	0	3960
16	23	0,003986382	0,044596656	0	4800
18	5	0,000818994	0,007868488	0	4800
18	19	0,014056	0,157248	0	4800
19	20	0,015311	0,171288	0	4800
20	21	0,010291	0,115128	0	4800
21	22	0,010291	0,115128	0	4800
24	4	0,002979224	0,02862292	0	3960
25	14	0,023479613	0,225580588	0	1980
25	16	0,005966652	0,057324466	0	1980

Halaman ini sengaja dikosongkan



Halaman ini sengaja dikosongkan

Optimal Power Flow Considering Voltage Stability and Static Var Compensator (SVC) Using Sequential Quadratic Programming Method

M. Sulaiman
2211 100 119

Supervisor I : Dr. Rony Seto Wibowo ST., MT.
Supervisor II : Ir. Sjamsjul Anam, MT.

ABSTRACT

In this final project, examines the optimal power flow considering Voltage Stability and static var compensator (SVC). Optimization methods that used in this thesis is sequential quadratic programming method. This study aims to determine the effect of the SVC to the cost of generation and Maximum of load margin (λ) system. Load margin (λ) is a fundamental measure of proximity to voltage collapse[6]. SVC placed in several buses that have been selected with a predetermined capacity. Then calculate the optimal power flow with matpower to obtain optimum total generation cost with and without SVC. Simulation of optimal power flow with and without SVC in this final project performed on two conditions, the operating point and the collapse point. The load of collapse point is greater $(1 + \lambda)$ times then the load of operating point. So it will be seen the influence of SVC on load margin system. The use of SVC can reduce the cost of generating the system and also increasing the system voltage stability margin by the increasing load margin system.

Keywords: Optimal Power Flow, Voltage Stability, Static Var Compensator, Sequential Quadratic Programming.



Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Penulis dengan segala kerendahan hati melantunkan puji syukur Alhamdulillah atas kehadiran Allah SWT yang telah mencurahkan hidayah dan karunia-Nya, sehingga penyusunan laporan tugas akhir yang berjudul **“Aliran Daya Optimal Mempertimbangkan Kestabilan Tegangan dan Penggunaan Static Var Compensator (SVC) Menggunakan Metode Sequential Quadratic Programming”** dapat diselesaikan dengan baik dan lebih cepat. Laporan ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar sarjana Jurusan Teknik Elektro ITS.


Pada kesempatan yang penuh kebanggaan dan kebahagiaan ini, penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Bapak, ibu, dan adik-adik tercinta yang selalu memberikan doa dan semangat yang tak terbatas dan tak ternilai harganya.
2. Bapak Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT dan Bapak Ir. Sjamsjul Anam, MT selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu berharga demi memberikan bimbingan dan saran yang sangat membantu dan bermanfaat.
3. Seluruh dosen Jurusan Teknik Elektro yang telah banyak memberikan ilmu dan menginspirasi penulis.
4. Mas Faiz, Wisam J. N., Nani, dan Burhan yang telah bekerja sama dan membantu penulis.
6. Seluruh asisten Laboratorium Analisis Sistem Tenaga.
7. Rekan-rekan di Jurusan Teknik Elektro yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Akhir kata “Tiada Gading yang Tak Retak”. Oleh karena itu, kritik dan saran yang bersifat konstruktif sangat diharapkan. Semoga laporan tugas akhir ini dapat memberikan manfaat, membuka wawasan mengenai studi aliran daya optimal, dan mendorong penciptaan teknologi baru.

Surabaya, Juni 2015

Penulis



Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

Lembar Judul	
Lembar Pernyataan	
Lembar Pengesahan	
Abstrak.....	i
Abstract.....	iii
Kata Pengantar	v
Daftar Isi	vii
Daftar Gambar	ix
Daftar Tabel.....	xiii

BAB I PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 PERUMUSAN MASALAH	2
1.3 TUJUAN DAN MANFAAT	2
1.4 BATASAN MASALAH	3
1.5 METODE PENELITIAN	3
1.5.1 Studi Literatur	3
1.5.2 Pengumpulan Data	4
1.5.3 Pembuatan program dalam MATLAB dengan aplikasi software Matpower serta penerapan sequential quadratic programming pada optimal power flow.....	4
1.5.4 Simulasi Dan Analisis	4
1.5.5 Penulisan Buku.....	4
1.6 SISTEMATIKA PENULISAN.....	4
1.6.1 BAB 1: Pendahuluan.....	4
1.6.2 BAB 2: Aliran Daya Optimal Mempertimbangkan Kestabilan Tegangan Dan SVC	4
1.6.3 BAB 3: Penerapan Sequential Quadratic Programming pada Aliran Daya Optimal.	5
1.6.4 BAB 4: Simulasi dan Analisis.....	5
1.6.5 BAB 5: Penutup	5
1.7 RELEVANSI.....	5

BAB II ALIRAN DAYA OPTIMAL MEMPERTIMBANGKAN KESTABILAN TEGANGAN DAN SVC

2.1 SISTEM TENAGA LISTRIK	7
2.1.1 Tujuan Operasi Sistem Tenaga Listrik	9

2.2	ALIRAN DAYA LISTRIK	10
2.3	PERSAMAAN ALIRAN DAYA.....	11
2.4	ALIRAN DAYA OPTIMAL ATAU OPTIMAL POWER FLOW (OPF)...	14
2.4.1	Pengertian Optimal Power Flow ^[3]	14
2.4.2	Persamaan Matematis OPF	16
2.5	STATIC VAR COMPENSATOR (SVC).....	17
2.5.1	Fungsi Static Var Compensator	19
2.5.2	Cara Kerja SVC	20
2.6	STABILITAS SISTEM TENAGA	21
2.7	KESTABILAN TEGANGAN	22
2.7.1	Kriteria kestabilan tegangan.....	23
2.7.2	Mekanisme Ketidakstabilan Tegangan	23
2.8	OPTIMISASI SEQUENTIAL QUADRATIC PROGRAMMING (SQP) ^[7] ..	24
2.9	MATPOWER ^[8]	25
2.9.1	OPF di dalam Matpower	26

BAB III PENERAPAN SEQUENTIAL QUADRATIC PROGRAMMING PADA ALIRAN DAYA OPTIMAL

3.1	ALGORITMA	29
3.2	SEQUENTIAL QUADRATIC PROGRAMING (FMINCON)	30
3.2.1	Sintaksis Sequential Quadratic Programming (fmincon) ...	30
3.2.2	Input Argumen dari Sequential Quadratic Programming (fmincon).....	31
3.2.3	Sequential Quadratic Programming pada OPF	32
3.2.3.1	Inisialisasi Permasalahan OPF	32
3.2.3.2	Inisialisasi x_0 Sebagai Nilai Awal	33
3.2.3.3	Pembentukan fungsi objektif F dan DF	35
3.2.3.4	Pembentukan Equality Constraint Berupa Matrik g dan juga dg	36
3.2.3.5	Pembentukan Inequality Constraint berupa matrik h dan dh	38
3.2.3.6	Pembentukan Vektor lb dan ub yang Menyatakan Batas Atas dan Bawah dari Variabel yang dioptimasi.....	40


BAB IV SIMULASI DAN ANALISIS

4.1	SISTEM IEEE 14 BUS	43
4.1.1	Pengujian Tahap 1 Sistem IEEE 14 bus	44
4.1.1.1	Analisa Pengujian Tahap 1 Sistem IEEE 14 bus	44
4.1.2	Pengujian Tahap 2 Sistem IEEE 14 bus	46

4.1.2.1	Analisis Pengujian Tahap 2 Sistem IEEE 14 bus	47
4.2	SISTEM IEEE 30 BUS.....	49
4.2.1	Pengujian Tahap 1 Sistem IEEE 30 bus	49
4.2.1.1	Analisa Pengujian Tahap 1 Sistem IEEE 30 bus.....	50
4.2.2	Pengujian Tahap 2 Sistem IEEE 30 bus	52
4.2.2.1	Analisis Pengujian Tahap 2 Sistem IEEE 30 bus	53
4.3	SISTEM JAWABALI	55
4.3.1	Pengujian Tahap 1 Sistem 25 Bus Jawabali	55
4.3.1.1	Analisa Pengujian Tahap 1 Sistem Jawabali	56
4.3.2	Pengujian Tahap 2 Sistem 25 Bus Jawabali	58
4.3.2.1	Analisis Pengujian Tahap 2 Sistem Jawabali	60

BAB V PENUTUP

5.1	KESIMPULAN	63
5.2	SARAN.....	63
	Daftar Pustaka.....	65
	Lampiran.....	67
	Biografi Penulis	



Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Besaran yang diketahui dan dihitung pada bus	11
Tabel 4.1	Penempatan <i>SVC</i> pada Sistem IEEE 14 bus.....	44
Tabel 4.2	Data hasil simulasi pengujian tahap 1 pada Sistem IEEE 14 bus	44
Tabel 4.3	Data hasil pengujian tahap 2 Sistem IEEE 14 bus	46
Tabel 4.4	Data hasil pengujian tahap 2 Sistem IEEE 14 bus (Lanjutan)	47
Tabel 4.5	Penempatan <i>SVC</i> di Sistem IEEE 30 bus	50
Tabel 4.6	Data hasil simulasi pengujian tahap 1 pada Sistem IEEE 30 bus	50
Tabel 4.7	Penempatan <i>SVC</i> di Sistem IEEE 30 bus	52
Tabel 4.8	Data hasil pengujian tahap 2 Sistem IEEE 30 bus	52
Tabel 4.9	Data hasil pengujian tahap 2 Sistem IEEE 30 bus (Lanjutan).....	53
Tabel 4.10	Penempatan <i>SVC</i> pada sistem Jawabali	56
Tabel 4.11	Data hasil simulasi pengujian tahap 1 Sistem Jawabali	56
Tabel 4.12	Penempatan <i>SVC</i> pada Sistem 25 bus Jawabali	58
Tabel 4.13	Data hasil pengujian Sistem 25 bus Jawabali tahap 2	59
Tabel 4.14	Biaya pembangkitan Jawabali saat <i>load margin</i> = 0,4	60



Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Diagram satu garis sistem tenaga listrik	7
Gambar 2.2	Sistem Tenaga Listrik Terinterkoneksi	8
Gambar 2.3	Tujuan operasi sistem tenaga listrik	10
Gambar 2.4	Penggambaran Bus secara Umum	13
Gambar 2.5	<i>One-line</i> Diagram dari konfigurasi SVC.....	18
Gambar 2.6	SVC di Gardu Induk	19
Gambar 2.7	karakteristik SVC [4]	21
Gambar 2.8	kurva P-V	23
Gambar 4.1	Pengaruh SVC terhadap λ pada Sistem IEEE 14 bus.....	45
Gambar 4.2	Pengaruh SVC Pada Biaya pada Sistem IEEE 14 dengan $\lambda_{\max}=0,8$	48
Gambar 4.3	Pengaruh SVC terhadap P & Q generator pada Sistem IEEE 14 bus	49
Gambar 4.4	Pengaruh SVC terhadap λ pada Sistem IEEE 30 Bus	50
Gambar 4.5	Pengaruh SVC pada biaya pembangkitan Sistem IEEE 30 bus dengan $\lambda = 0,3$	54
Gambar 4.6	Pengaruh SVC pada P dan Q generator pada Sistem IEEE 30 bus	55
Gambar 4.7	Pengaruh SVC terhadap <i>load margin</i> pada Sistem Jawabali	57
Gambar 4.8	Pengaruh SVC terhadap biaya pembangkitan Pada sistem Jawabali	60
Gambar 4.9	Pengaruh SVC terhadap penghematan Total biaya pembangkitan	61
Gambar 4.10	Pengaruh SVC terhadap P dan Q generator pada Sistem Jawabali	62



Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Robandi, Imam. “*Modern Power System Control*”, Penerbit ANDI. Yogyakarta, Bab 1, 2009.
- [2] Greene, S., Dobson, I., Alfaro, L. F.,” Sensitivity of The Loading Margin To Voltage Collapse With Respect To Arbitrary Parameters “, IEEE Transaction on Power Systems Vol.12, No.1, February 1997.
- [3] Momoh, James A, “*Electric Power System Application of Optimization*”, CRC Press, 2008.
- [4] K.R. Padiyar: “*Power System Dynamics: Stability and Control*”, 2nd edition, BS Publications, 2002.
- [5] C. Sharma dan M. G. Ganes, "Determination of the Applicability of using Modal Analysis for the Prediction of Voltage Stability," in Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008.
- [6] Prabha Kundur, “*Power System Stability and Control*”. New York, USA: McGraw-Hill, 1994.
- [7] Dr. M. Al- Salamah, “Successive Quadratic Programming Method for Constrained Problems”, Industrial Engineering KFUPM.
- [8] Ray D, Zimmerman Carlos E. Murillo-S_anchez, “Matpower 3.2 User's Manual”, February 7, 2011.
- [9] A. J. Conejo, F. Milano, and R. Garcia-Bertrand, “Congestion Management Ensuring Voltage Stability,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 21, no. 1, pp. 357–364, Feb. 2006.
- [10] Hingorani, N. G. & Gyugyi, L. “Understanding FACTS Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems”. IEEE. ISBN 0-7803-3455-8.
- [11] Shahidehpour M, Yatim H, Zuyi Li, “Market Operations in Electric Power Systems”, New York: John Wiley & Sons Inc, 2002.
- [12] R. S. Wibowo, N. Yorino, M. Eghbal, Y. Zoka, and Y. Sasaki, “FACTS Devices Allocation With Control Coordination Considering Congestion Relief and Voltage Stability” IEEE Trans. Power Svst., vol. 26, no. 4, November 2011.
- [13] Andi M. N., Arfita Y. D., "Studi Analisa Kestabilan Tegangan Sistem 150 kV Berdasarkan Perubahan Tegangan" Jurnal Teknik Elektro ITP, Volume 2, No. 1; Januari 2013.



Halaman ini sengaja dikosongkan

BIOGRAFI



Penulis memiliki nama lengkap M. Sulaiman. Lahir di Pasuruan pada tanggal 13 Januari 1993. Penulis mulai menempuh jalur pendidikan formal di TK Bajangan pada tahun 1997-1999. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan dasar di SD Negeri Bajangan hingga tahun 2005. Setelah lulus dari jenjang pendidikan dasar dengan predikat peraih DANEM tertinggi di SD Bajangan, penulis melanjutkan pendidikan menengah di SMPN 1 Gondang Weatan. Pada tahun 2008, penulis memilih untuk melanjutkan pendidikan menengah atas di SMAN 1 Pasuruan. Penulis akhirnya dapat melanjutkan pendidikan di tingkat perguruan tinggi melalui jalur SNMPTN Tulis di Jurusan Teknik Elektro ITS pada tahun 2011.

Email :
Sulaimanm99@gmail.com

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Saat ini energi listrik telah menjadi suatu kebutuhan utama bagi manusia, seperti kebutuhan utama yang lain. Masyarakat modern tidak dapat melakukan aktivitas dengan baik tanpa tenaga listrik. Hampir semua aktivitas manusia membutuhkan tenaga listrik. Kebutuhan akan tenaga listrik selalu bertambah dari waktu ke waktu. Untuk tetap dapat melayani kebutuhan tenaga listrik, maka pembangkitan tenaga listrik haruslah dikembangkan seiring dengan kenaikan kebutuhan akan tenaga listrik. Permintaan tenaga listrik yang terus bertambah menyebabkan tenaga listrik yang harus disuplai oleh pembangkit menjadi sangat besar. Banyak sekali hal yang mempengaruhi pembangkitan tenaga listrik, salah satu yang paling utama adalah penggunaan bahan bakar. Selain itu, peningkatan kebutuhan tenaga listrik harus diimbangi dengan pengelolaan sumber pembangkit yang baik. Sehingga mampu menyediakan tenaga listrik ekonomis dan tetap menjaga kualitas prima meliputi kontinuitas, seimbang, stabil dan kadar harmonik yang rendah[1].

Aliran Daya Optimal atau *Optimal Power Flow* (OPF) merupakan perhitungan untuk meminimalkan suatu fungsi yaitu biaya pembangkitan suatu pembangkit tenaga listrik dan rugi-rugi pada saluran transmisi dengan mengatur pembangkitan daya aktif dan reaktif setiap pembangkit yang terinterkoneksi dengan memperhatikan batas-batas tertentu. Batas yang umum dinyatakan dalam perhitungan analisis aliran daya optimal adalah berupa batas minimum dan maksimum untuk pembangkitan daya aktif pada pembangkit.

Dalam analisis *optimal power flow*, tujuan utama adalah untuk meminimal biaya pembangkitan pada sistem tenaga. Pada *optimal power flow*, saat beban ringan, pembangkit termurah selalu menjadi pilihan pertama. Jika beban naik, pembangkit yang lebih mahal yang kemudian akan dimasukkan. Jadi biaya pembangkitan sangat penting dalam penyelesaian *OPF*. Selain untuk meminimalkan biaya pembangkitan agar harga listrik menjadi murah dan terjangkau, namun juga tidak boleh mengabaikan kestabilan tegangan dan untuk mencapainya dibutuhkan *static var compensator* (SVC). *SVC* sendiri berfungsi sebagai pemelihara kestabilan saat kondisi *steady state* dalam batasan yang sudah ditentukan pada jaringan transmisi berjarak jauh dan berbeban

tinggi *heavily loaded*.

Pada tugas akhir ini, digunakan metode *sequensial quadratic programming* untuk menyelesaikan perhitungan *optimal power flow* pada dua kondisi yaitu saat *operating point* dan juga saat *collapse point*. SVC di tempatkan di beberapa bus sistem yang sudah ditentukan. Setelah itu dilakukan perhitungan *OPF* untuk mengetahui pengaruh SVC terhadap biaya pembangkitan dan juga *load margin* sistem. *Load margin* adalah suatu ukuran fundamental untuk mengetahui jarak atau kedekatan terhadap *voltage collapse*[2].

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan diselesaikan dalam Tugas Akhir ini adalah:

1. Bagaimana membuat program *optimal power flow* yang mempertimbangkan kestabilan tegangan dan juga penggunaan *static var compensator*.
2. Bagaimana menentukan besar daya aktif dan daya reaktif yang harus dibangkitkan oleh setiap pembangkit agar biaya pembangkitan menjadi seminimal mungkin tanpa melanggar batasan-batasan yang sudah ditentukan.
3. Bagaimana pengaruh dari pemasangan *static var compensator* terhadap biaya pembangkitan sistem tenaga listrik.
4. Bagaimana pengaruh dari daya reaktif yang diinjeksikan oleh *static var compensator* pada suatu sistem tenaga listrik terhadap *maximum load margin* sistem.

1.3 Tujuan Dan Manfaat

Tujuan yang ingin dicapai dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Menentukan besar daya aktif dan daya reaktif yang harus dibangkitkan oleh setiap pembangkit secara optimal.
2. Mensimulasikan dan juga menganalisa pengaruh dari penggunaan *static var compensator* terhadap *load margin* dan biaya pembangkitan pada suatu sistem tenaga listrik.
3. Memperoleh biaya pembangkitan yang seminimal mungkin tanpa melanggar batasan yang sudah ditentukan

Manfaat yang diharapkan dari tugas akhir ini adalah :

1. Memberikan solusi untuk meminimalkan total biaya pembangkitan dengan penggunaan *static var compensator*

- dan tetap menjaga batasan tegangan setiap bus dan batasan pembebanan saluran yang telah ditentukan.
2. Mengetahui manfaat dari penggunaan *static var compensator* pada suatu sistem tenaga listrik.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Metode yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan aliran daya optimal atau *optimal power flow* adalah metode *sequential quadratic programming*.
2. *Software* yang digunakan untuk simulasi adalah *MATLAB*.
3. Kapasitas saluran transmisi diperhatikan.
4. *Test systems* menggunakan Sistem IEEE 14 bus, Sistem IEEE 30 bus dan Sistem 25 bus Jawabali yang telah dimodifikasi.
5. Data beban awal ditentukan.
6. Data beban tidak melebihi kapasitas total pembangkitan.
7. *Static var compensator* disimulasikan sebagai generator yang hanya mensuplai daya reaktif.
8. Lokasi dan kapasitas *SVC* sudah ditentukan.
9. Semua biaya menyangkut *SVC* tidak diperhitungkan.

1.5 Metode Penelitian

Pada tugas akhir ini akan dilakukan penelitian tentang perhitungan *optimal power flow* (OPF) yang mempertimbangkan kestabilan tegangan dan penggunaan *static var compensator* (SVC). Oleh karena itu, perhitungan *OPF* akan dihitung dalam dua kondisi yaitu saat *operating point* dan *collapse point*. Dimana beban saat *collapse point* lebih besar dari pada saat *operating point*. Untuk mendapatkan pembangkitan yang optimal dari suatu sistem tenaga listrik akan digunakan metode *sequential quadratic programming* (SQP) sebagai metode perhitungan. Data yang digunakan dalam tugas akhir ini meliputi *cost function*, batasan pembangkitan setiap pembangkit dan kapasitas saluran transmisi. Perhitungan *OPF* akan disimulasikan dengan menggunakan *software MATLAB* dengan aplikasi *software matpower*. Tahapan dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1.5.1 Studi Literatur

Literatur-literatur yang digunakan berasal dari jurnal, prosiding, internet dan *text book*.

1.5.2 Pengumpulan Data

Data yang dibutuhkan berupa *cost function*, pembangkitan maksimum dan minimum, kapasitas saluran dan lain-lain.

1.5.3 Pembuatan program dalam MATLAB dengan aplikasi software Matpower serta penerapan sequential quadratic programming pada optimal power flow.

Program yang dibuat akan diuji terlebih dahulu untuk sistem yang kecil untuk kemudian digunakan pada sistem yang besar yaitu Sistem IEEE 14 bus, Sistem IEEE 30 bus dan Sistem 25 bus Jawabali yang telah dimodifikasi.

1.5.4 Simulasi Dan Analisis

Simulasi dilakukan dalam dua kondisi, kondisi pertama *operating point* dan kondisi kedua *collapse point* dengan menambahkan *static var compensator* pada beberapa bus yang sudah ditentukan. Data yang diperoleh dari hasil simulasi tersebut akan dianalisis untuk mengetahui pengaruh SVC terhadap *maximum load margin* sistem dan biaya total pembangkitan.

1.5.5 Penulisan Buku

Penulisan laporan dilakukan sebagai penggambaran kesimpulan dari tugas akhir ini. Kesimpulan tersebut merupakan jawaban dari permasalahan yang dianalisa. Selain itu juga akan diberikan saran sebagai masukan berkaitan dengan apa yang telah dilakukan.

1.6 Sistematika Penulisan

Laporan Tugas Akhir ini disusun dalam suatu sistematika sebagai berikut:

1.6.1 BAB 1: Pendahuluan

Bab ini membahas mengenai latar belakang, tujuan penelitian, permasalahan, batasan masalah, metode penelitian, sistematika penulisan dan relevansi dari Tugas Akhir.

1.6.2 BAB 2: Aliran Daya Optimal Mempertimbangkan Kestabilan Tegangan Dan SVC

Bab ini berisi tentang dasar teori yang merupakan penjelasan mengenai aliran daya optimal atau *optimal power flow*, kestabilan tegangan, *static var compensator* dan *sequential quadratic programming* serta sistem kelistrikan secara umum.

1.6.3 BAB 3: Penerapan *Sequential Quadratic Programming* pada Aliran Daya Optimal.

Bab ini berisi tentang penjelasan mengenai penerapan *sequential quadratic programming* pada permasalahan aliran daya optimal pada dua kondisi yaitu *operating point* dan *collapse point*.

1.6.4 BAB 4: Simulasi dan Analisis

Bab ini berisi hasil simulasi aliran daya optimal atau *optimal power flow* dengan *sequential quadratic programming* serta analisis perbedaan hasil pembangkitan optimal dengan dan tanpa *static var compensator*.


1.6.5 BAB 5: Penutup

Kesimpulan yang diperoleh dari hasil pembahasan dan saran-saran yang berhubungan dengan pokok-pokok pembahasan.

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Dapat memberikan manfaat terhadap perkembangan sistem tenaga listrik khususnya pada permasalahan yang mengenai aliran daya optimal dan *static var compensator*.
2. Dapat menambah penguasaan ilmu pengetahuan dan teknologi (IPTEK) di bidang optimasi pembangkitan tenaga listrik bagi penulis.
3. Dapat menjadi referensi bagi mahasiswa lain yang akan mengambil Tugas Akhir dengan permasalahan yang serupa.



Halaman ini sengaja dikosongkan

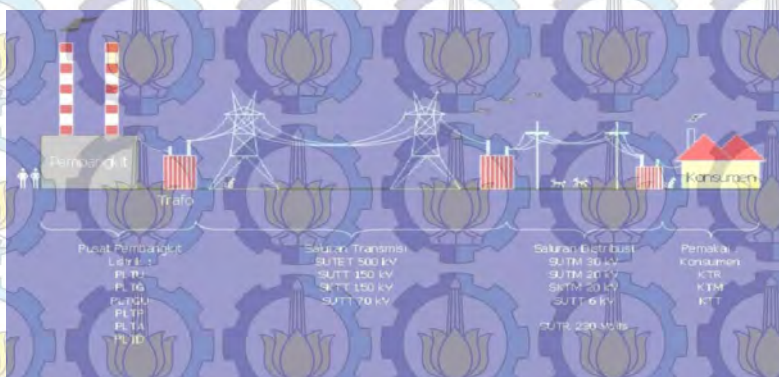
BAB II ALIRAN DAYA OPTIMAL MEMPERTIMBANGKAN KESTABILAN TEGANGAN DAN SVC

2.1 Sistem Tenaga listrik

kebutuhan akan tenaga listrik dari konsumen selalu bertambah dari waktu ke waktu. Untuk tetap dapat melayani kebutuhan tenaga listrik dari konsumen, maka sistem tenaga listrik haruslah dikembangkan seiring dengan kenaikan kebutuhan akan tenaga listrik dari konsumen. Sistem tenaga listrik merupakan sekumpulan pusat listrik dan pusat beban atau gardu induk yang dihubungkan oleh jaringan transmisi sehingga menjadi kesatuan interkoneksi. Secara umum sistem tenaga listrik dibagi menjadi beberapa bagian antara lain:

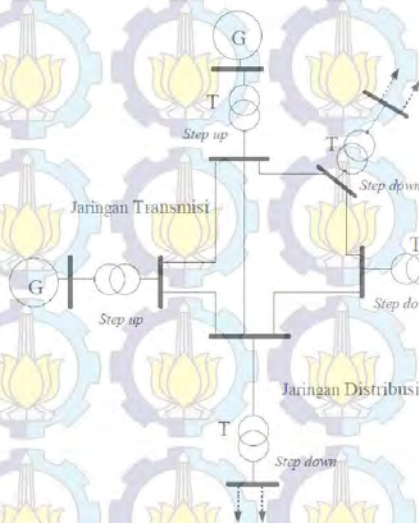
1. pembangkit tenaga listrik
2. penyaluran tenaga listrik
3. distribusi tenaga listrik dan beban.

Sistem tenaga listrik *modern* merupakan sistem yang kompleks yang terdiri dari pusat pembangkit, saluran transmisi dan jaringan distribusi yang berfungsi untuk menyalurkan daya dari pusat pembangkit ke pusat-pusat beban. Untuk memenuhi tujuan operasi sistem tenaga listrik, ketiga bagian yaitu pembangkit, transmisi dan distribusi tersebut satu dengan yang lainnya tidak dapat dipisahkan. Gambar sistem tenaga listrik ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Diagram satu garis sistem tenaga listrik

Pusat pembangkit listrik (*power plant*) yaitu tempat pertamakalinya listrik dibangkitkan, dimana terdapat turbin sebagai penggerak mula (*prime mover*) dan generator yang membangkitkan listrik. Sedangkan transmisi tenaga listrik merupakan proses penyaluran tenaga listrik dari tempat pembangkitan tenaga listrik (*power plant*) hingga saluran distribusi listrik (*substation distribution*) sehingga dapat disalurkan sampai pada konsumen pengguna listrik. Sistem distribusi dapat dikelompokkan dalam dua tingkat yaitu : saluran distribusi primer dan saluran distribusi sekunder. Saluran distribusi primer terletak pada sisi trafo distribusi, yaitu antara titik sekunder trafo substation dengan titik primer trafo distribusi yang berfungsi menyalurkan tenaga listrik bertegangan menengah yaitu 20 kV, sedangkan saluran distribusi sekunder terletak pada sisi sekunder trafo distribusi, yaitu antara titik sekunder dengan titik cabang menuju beban yang berfungsi menyalurkan tenaga listrik bertegangan rendah yaitu 220/380 V. Secara umum beban yang dilayani oleh sistem distribusi listrik dibagi dalam beberapa sektor yaitu sektor perumahan, sektro industri, sektor komersial dan sektor usaha.



Gambar 2.2 Sistem Tenaga Listrik Terinterkoneksi

Biaya pembangkitan tenaga listrik pada umumnya merupakan bagian biaya yang terbesar dari biaya operasi suatu perusahaan listrik. Secara garis besar biaya operasi dari suatu sistem tenaga listrik terdiri dari :

1. Biaya pembangkitan tenaga listrik
2. Biaya operasi
3. Biaya lain-lain

2.1.1 Tujuan Operasi Sistem Tenaga Listrik

Untuk mendapatkan operasi sistem tenaga listrik yang baik maka perlu diperhatikan tiga hal berikut ini, yaitu:

1. Ekonomi (*economy*),
2. Keandalan (*security*),
3. Kualitas (*quality*).

Ekonomi (*economy*) berarti listrik harus dioperasikan secara ekonomis, tetapi dengan tetap memperhatikan keandalan dan kualitasnya.

Keandalan (*security*) merupakan tingkat keamanan sistem terhadap kemungkinan terjadinya gangguan. Sedapat mungkin gangguan di pembangkit maupun transmisi dapat diatasi tanpa mengakibatkan pemadaman di sisi konsumen.

Kualitas (*quality*) tenaga listrik yang diukur dengan kualitas tegangan dan frekuensi yang dijaga sedemikian rupa sehingga tetap pada kisaran yang ditetapkan.

Didalam pelaksanaan pengendalian operasi sistem tenaga listrik, urutan prioritas dari sasaran diatas bisa berubah-ubah tergantung pada kondisi *real time*. Pada saat terjadi gangguan, maka keamanan adalah prioritas utama sedangkan mutu dan ekonomi bukanlah hal yang utama. Demikian juga pada saat keamanan dan mutu sudah bagus, maka selanjutnya ekonomi harus diprioritaskan.

Efisiensi produksi tenaga listrik diukur dari tingkat biaya yang digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik. Hal yang paling mudah dalam optimasi biaya produksi tenaga listrik adalah dengan sistem *Merit Order*. *Merit order* ini adalah suatu metode dimana pembangkit dengan biaya yang paling murah akan diprioritaskan untuk beroperasi dibandingkan dengan yang lebih mahal, sampai beban tenaga listrik tercukupi.

Sebagai gambaran dari tujuan operasi sistem tenaga listrik dapat dilihat seperti pada Gambar 2.3. dibawah ini.



Gambar 2.3 Tujuan operasi sistem tenaga listrik

2.2 Aliran Daya Listrik

Analisa aliran daya merupakan studi dasar dalam menganalisa suatu sistem tenaga listrik, baik untuk perencanaan maupun operasi. Pada dasarnya sasaran utama dari semua analisa aliran daya adalah menentukan besar dan sudut fasa tegangan pada setiap bus, dengan diketahuinya tegangan maka daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) dapat dihitung. Jika P dan Q pada dua buah bus diketahui maka aliran daya dengan jelas dapat diketahui, serta rugi-rugi daya saluran penghubung dapat diketahui. Secara umum tujuan analisa aliran daya adalah:

1. Untuk memeriksa tegangan dan sudut fasa masing-masing bus.
2. Untuk memeriksa kemampuan semua peralatan yang ada dalam sistem apakah cukup besar untuk menyalurkan daya yang diinginkan.
3. Untuk memperoleh kondisi awal bagi studi-studi selanjutnya, yakni studi hubung singkat, studi rugi-rugi transmisi dan studi stabilitas.

Ada 3 macam bus, dalam hal ini setiap bus mempunyai empat besaran dengan dua besaran diantaranya diketahui yakni:

1. **BUS REFERENSI** (*slack bus*). Adalah suatu bus yang selalu mempunyai besaran dan sudut fasa yang tetap dan telah diberikan sebelumnya, pada bus ini berfungsi untuk mencatu rugi-rugi, kekurangan daya yang ada pada jaringan, dalam hal ini penting karena kekurangan daya tidak dapat dicapai kecuali terdapat suatu bus yang mempunyai daya tak terbatas sehingga dapat mengimbangi rugi-rugi.

2. BUS PQ (bus beban). Pada tipe bus ini daya aktif dan daya reaktif diketahui, sedangkan dua lainnya didapat dari hasil perhitungan.
3. BUS PV (bus pembangkit). Pada tipe bus ini, besar tegangan dan daya aktif telah ditentukan. Sedangkan untuk daya reaktif dan sudut fasa tegangan didapat dari hasil perhitungan.

Pada tiap-tiap bus terdapat 4 besaran, yaitu :

1. Daya real atau daya aktif P
2. Daya reaktif Q
3. Harga skalar tegangan $|V|$
4. Sudut fasa tegangan q

Tabel 2.1 Besaran yang diketahui dan dihitung pada bus

Jenis Bus	Besaran	
	Diketahui	Dihitung
Slack/Swing	V, d	P, Q
Beban	P, Q	d, V
Generator	V, P	Q, d

Suatu sistem tenaga listrik bisa terdiri dari ratusan titik (*bus*) dengan harga impedansi tertentu yang dinyatakan dalam satuan per unit dari MVA *base*. Persamaan sistem dapat dirumuskan secara sistematis dalam bentuk yang bermacam-macam. Umumnya, metode titik (*bus*) tegangan yang paling cocok dan sering digunakan dalam berbagai analisis aliran daya. Saat arus titik tersebut ditentukan, maka persamaan tersebut dapat diselesaikan menggunakan nilai tegangan *bus*-nya.

2.3 Persamaan Aliran Daya

Berdasar hukum Kirchhoff Arus, hubungan antara besar tegangan bus dan arus dinyatakan dalam persamaan titik tegangan.

$$I_{bus} = Y_{bus} V_{bus} \quad (2.1)$$

Untuk sistem dengan n bus yang independen kita dapat menulis persamaan diatas sebanyak n persamaan.

$$\begin{aligned} I_1 &= Y_{11}V_{11} + Y_{12}V_2 + \dots + Y_{1n}V_n \\ I_2 &= Y_{21}V_{21} + Y_{22}V_2 + \dots + Y_{2n}V_n \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$I_n = Y_{n1}V_{n1} + Y_{n2}V_2 + \dots + Y_{nn}V_n$$

Persamaan di atas jika dinyatakan ke dalam bentuk matriks admitansi dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Atau

$$I = [Y][V] \quad (2.4)$$

Dimana

I = vektor arus

V = vektor tegangan

Y = matrik admitansi bus

n = jumlah total titik

Y_{ii} = admitansi sendiri dari titik i

Y_{ij} = mutual admitansi dari titik i dan j

Bila tidak ada line antara titik i dan titik j maka nilai Y_{ij} adalah nol.

Arus bus bisa direpresentasikan oleh:

$$\begin{aligned} I_i &= \frac{S_i}{V_i} = \frac{S_{Gi} - S_{Di}}{V_i} \\ &= \frac{(P_{Gi} - P_{Di}) - j(Q_{Gi} - Q_{Di})}{V_i} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Dimana:

s = vektor daya kompleks

P_{Gi} = output daya aktif generator di bus i

P_{Di} = beban aktif di bus i

Q_{Gi} = output daya reaktif generator di bus i

Q_{Di} = beban reaktif di bus i

Bila disubstitusi antara 2.4 dan 2.1 maka akan didapatkan

$$\frac{(P_{Gi} - P_{Di}) - (Q_{Gi} - Q_{Di})}{V_i} = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + \dots + Y_{in}V_n; \quad (2.6)$$

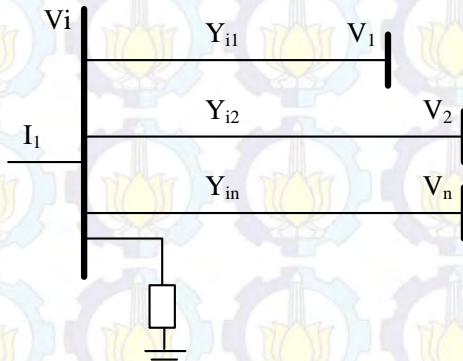
$$i = 1, 2, \dots, n$$

Dalam aliran daya, beban merupakan variabel yang diketahui, bila dipisah antara daya aktif dan reaktif maka:

$$P_i = P_{Gi} - P_{Di} \quad (2.7)$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} \quad (2.8)$$

Penggambaran bus secara umum pada suatu jaringan sistem tenaga listrik yang terdiri dari beberapa input dan output diberikan pada Gambar 2.4 berikut ini.



Gambar 2.4 Penggambaran Bus secara Umum

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (2.9)$$

Atau

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (2.10)$$

Substitusi nilai I_i pada 2.9 menghasilkan

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = Vi \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad j \neq 1 \quad (2.11)$$

Persamaan aliran daya tersebut diselesaikan dengan menggunakan suatu proses pengulangan (iterasi) dengan menetapkan nilai-nilai perkiraan untuk tegangan pada bus yang tidak diketahui nilainya dan kemudian menghitung suatu nilai baru untuk setiap tegangan bus dari nilai perkiraan pada bus yang lain. Setiap perhitungan suatu himpunan nilai tegangan yang baru disebut sebagai satu iterasi. Proses iterasi ini diulang terus-menerus hingga perubahan yang terjadi pada setiap bus kurang dari nilai minimum atau tidak melebihi nilai maksimum yang telah ditentukan.

2.4 Aliran Daya Optimal atau *Optimal Power Flow (OPF)*

Pada Tugas Akhir ini akan disimulasikan perhitungan *OPF* mempertimbangkan kestabilan tegangan dan penggunaan SVC pada sebuah sistem tenaga listrik.

2.4.1 Pengertian *Optimal Power Flow* [3]

Ide dari *optimal power flow* pertama kali dikembangkan pada tahun 1960an sebagai kelanjutan dari *economic dispatch* konvensional untuk menentukan pengaturan optimal dari variabel-variabel yang dibatasi berbagai macam konstrain. *Optimal power flow* merupakan perhitungan untuk meminimalkan suatu fungsi yaitu biaya pembangkitan suatu pembangkit tenaga listrik atau rugi-rugi saluran pada sistem tenaga transmisi dengan mengatur dengan mengatur pembangkitan daya aktif dan reaktif setiap pembangkit yang terinterkoneksi dengan memperhatikan batas-batas tertentu. Batas yang umum dinyatakan dalam perhitungan analisis aliran daya optimal adalah berupa batas minimum dan maksimum untuk pembangkitan daya aktif pada pembangkit.

OPF digunakan untuk mengoptimasi aliran daya dari sistem tenaga berskala besar. Cara ini dilakukan dengan mempersecil fungsi-fungsi objektif yang dipilih sambil mempertahankan daya guna sistem yang dapat diterima dari batas kemampuan daya pada generator.

Berikut ini merupakan fungsi sederhana yang digunakan dalam permasalahan OPF:

$$\begin{aligned} &F(\bar{x}, \bar{u}) \\ &g(\bar{x}, \bar{u}) \\ &h(\bar{x}, \bar{u}) \leq 0 \end{aligned}$$

Dimana $F(\bar{x}, \bar{u})$ untuk memenuhi batasan-batasan $g(\bar{x}, \bar{u}) = 0$ dan $h(\bar{x}, \bar{u}) \leq 0$, sedangkan $g(\bar{x}, \bar{u})$ adalah *nonlinier equality constraints* (persamaan aliran daya) yang menggambarkan fisik dari sistem seperti halnya *set point* tegangan yang diinginkan pada seluruh sistem. Fisik dari sistem tersebut memaksa persamaan aliran daya yang diinjeksikan terutama daya aktif dan daya reaktif pada setiap bus jumlahnya sama dengan nol dan $h(\bar{x}, \bar{u})$ adalah *nonlinier inequality constraints* merupakan komponen dari peralatan sistem tenaga listrik yang memiliki batas operasi, batas ini dibuat untuk keamanan. Oleh sebab itu, fungsi objektif dapat diminimalkan dengan pemeliharaan komponen sistem tenaga listrik dengan memperhatikan batas-batas keamanan. Vektor x terdiri dari nilai variabel-variabel meliputi *voltage magnitude* dan sudut fasanya, keluaran MVar dari generator yang dirancang untuk pengaturan tegangan bus dan juga terdiri dari beberapa parameter-parameter yang bernilai tetap meliputi sudut fasa pada *reference bus*, line parameter, dll. Vektor u berdiri dari nilai variabel control meliputi daya aktif dan daya reaktif dari pembangkitan, beban MW dan MVar.

Tujuan utama dari *OPF* adalah untuk menentukan pengaturan variabel kontrol dan sistem persamaan yang mengoptimalkan nilai fungsi objektif. Pemilihan fungsi ini harus didasarkan pada analisis yang cermat dari sistem daya listrik dan secara ekonomi. Variabel kontrol pada masalah aliran daya yang optimal merupakan kuantitas yang nilainya bisa disesuaikan secara langsung untuk membantu meminimalkan fungsi tujuan dan memenuhi batasan-batasan. Variabel kontrol dapat berupa: daya aktif generator, daya reaktif generator, rasio tap trafo dan tegangan bus generator.

OPF adalah upaya yang dilakukan dalam pengoperasian sistem tenaga listrik supaya daya yang dialirkan dari generator hingga sampai ke beban dengan hasil yang optimal dan murah serta tanpa mengganggu berbagai batasan-batasan pengoperasian seperti batasan minimum dan maksimum daya pembangkitan oleh generator, batasan tegangan, frekuensi, harga, faktor daya, batasan area pengoperasian, keamanan, emisi dan sebagainya.

2.4.2 Persamaan Matematis OPF

Persamaan dari *optimal power flow* dari segi biaya pembangkitan direpresentasikan pada persamaan 2.12.

$$F_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (2.12)$$

Keterangan :

F_i = besar biaya pembangkitan pada pembangkit ke-i (Rp)

P_i = daya *output* dari pembangkit ke-i (MW)

a_i , b_i dan c_i adalah *cost coefficient* unit generator ke-i

Dalam memecahkan suatu masalah optimasi, seperti OPF, ada dua batasan yaitu *equality* dan *inequality constraint*. *Equality constraint* adalah batasan yang harus diikuti. Sebagai contoh dalam OPF ada persamaan keseimbangan daya aktif dan daya reaktif pada setiap bus harus selalu dicukupi.

Equality constrain pada OPF mempunyai persamaan sebagai berikut:

$$P_i = P_{gi} - P_{di} = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (2.13)$$

$$Q_i = Q_{gi} - Q_{di} = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (2.14)$$

Dimana $i = 1, 2, \dots, n$ menyatakan jumlah bus. P_i dan Q_i menyatakan injeksi daya aktif dan reaktif di bus i . P_{gi} dan Q_{gi} menyatakan daya aktif dan reaktif generator di bus i . P_{di} dan Q_{di} menyatakan daya aktif dan reaktif beban di bus i . $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$ menyatakan elemen dari ke $i - j$ dari matrik Y bus matrik.

Inequality constraint menggambarkan batasan operasi dan batas ini dibuat untuk batas keamanan. Berikut ini persamaan *Inequality constraint* pada OPF sebagai berikut:

1) Batasan kapasitas pembangkit :

$$\begin{aligned} P_{gi}^{min} &\leq P_{gi} \leq P_{gi}^{max}, & i = 1, 2, 3, \dots, N_g \\ Q_{gi}^{min} &\leq Q_{gi} \leq Q_{gi}^{max}, & i = 1, 2, 3, \dots, N_g \end{aligned} \quad (2.15)$$

2) Batasan tegangan :

$$\begin{aligned} V_i^{min} &\leq V_i \leq V_i^{max}, & i = 1, 2, 3, \dots, N_g \\ \delta_i^{min} &\leq \delta_i \leq \delta_i^{max}, & i = 1, 2, 3, \dots, N_g \end{aligned} \quad (2.16)$$

3) Batasan termal transmisi :

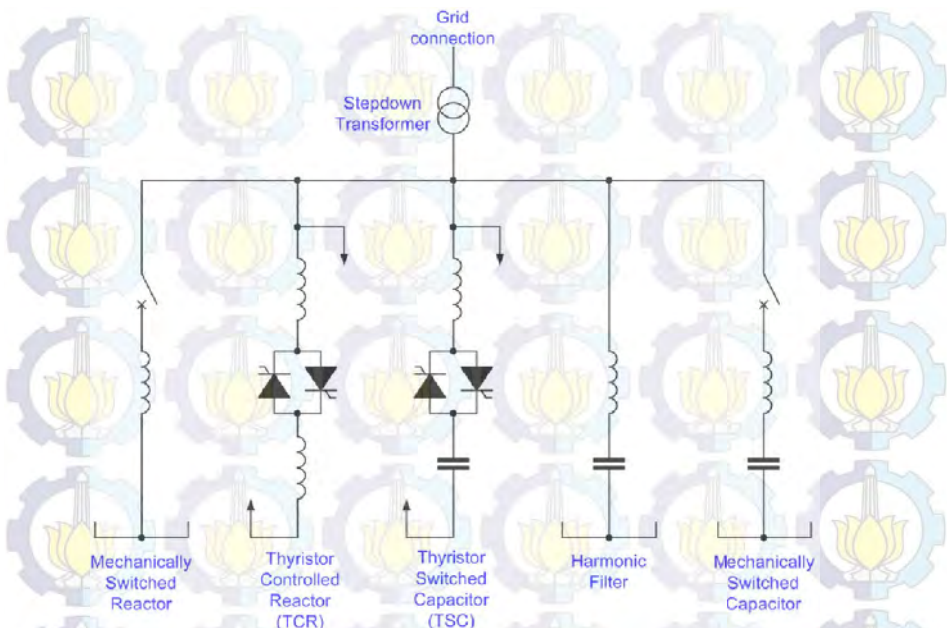
$$S_l \leq S_{l,max} \quad (2.17)$$

Dimana:

- P_i : Injeksi daya aktif di bus i
- Q_i : Injeksi daya reaktif di bus i
- P_{g_i} : Daya aktif di bus i
- P_{d_i} : Pembebanan daya aktif pada bus i
- Q_{g_i} : Daya reaktif di bus i
- P_{d_i} : Pembebanan daya aktif di bus i
- δ_i : Sudut fasa tegangan bus i
- δ_j : Sudut fasa tegangan bus j

2.5 Static VAR Compensator (SVC)

Static VAR Compensator (atau disebut *SVC*) adalah peralatan listrik untuk menyediakan kompensasi *fast-acting reactive power* pada jaringan transmisi listrik tegangan tinggi. *SVC* adalah bagian dari sistem peralatan AC transmisi yang fleksibel, pengatur tegangan dan menstabilkan sistem. Istilah “*static*” berdasarkan pada kenyataannya bahwa pada saat beroperasi atau melakukan perubahan kompensasi tidak ada bagian (part) *SVC* yang bergerak, karena proses kompensasi sepenuhnya dikontrol oleh sistem elektronika daya.



Gambar 2.5 One-line Diagram dari konfigurasi SVC

Jika power sistem beban reaktif kapasitif (leading), SVC akan menaikkan daya reaktor untuk mengurangi *var* dari sistem sehingga tegangan sistem turun. Pada kondisi reaktif induktif (lagging), SVC akan mengurangi daya reaktor untuk menaikkan *var* dari sistem sehingga tegangan sistem akan naik.

Pada SVC pengaturan besarnya *var* dan tegangan dilakukan dengan mengatur besarnya kompensasi daya reaktif induktif pada reaktor, sedangkan kapasitor bank bersifat statis.



Gambar 2.6 SVC di Gardu Induk

2.5.1 Fungsi Static Var Compensator

Kebutuhan daya reaktif pada sistem dapat dipasok oleh unit pembangkit, sistem transmisi, reaktor dan kapasitor. Karena kebutuhan daya reaktif pada sistem bervariasi yang disebabkan oleh perubahan beban, komposisi unit pembangkit yang beroperasi, perubahan konfigurasi jaringan, hal ini berdampak pada bervariasinya level tegangan pada gardu induk. Pada umumnya gardu-gardu induk yang berada jauh dari pembangkit akan mengalami penurunan level tegangan yang paling besar, oleh sebab itu diperlukan sistem kompensasi daya reaktif yang dapat mengikuti perubahan tegangan tersebut.

SVC dapat dengan cepat memberikan *supply* daya reaktif yang diperlukan dari sistem sehingga besarnya tegangan pada gardu induk dapat dipertahankan sesuai dengan standar yang diizinkan. Kestabilan tegangan pada gardu induk akan meningkatkan kualitas tegangan yang sampai kekonsumen, mengurangi losses dan juga dapat meningkatkan kemampuan penghantar untuk mengalirkan arus.

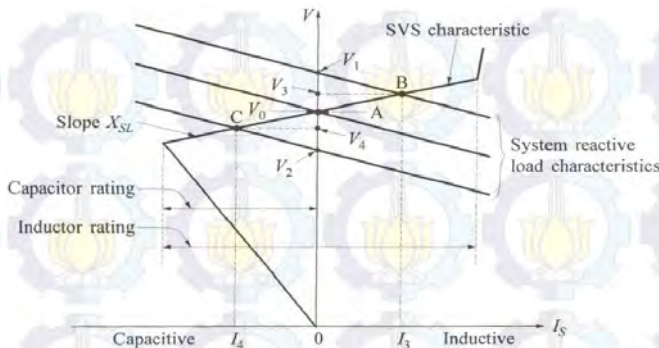
Pengaturan daya reaktif dilakukan dengan mengontrol besarnya daya reaktif pada reaktor, melalui pengaturan sudut penyulutan pada thyristor. Besarnya sudut penyulutan ini tergantung dari variasi tegangan pada gardu induk dengan kata lain semakin besar daya reaktif yang dibutuhkan maka sudut penyalan akan semakin kecil. Karena kontrol sudut penyalan ini dilakukan secara elektronik maka pengaturan tegangan dapat dilakukan secara lebih halus dan cepat. Thyristor pada kondisi beroperasi akan menghasilkan panas sehingga diperlukan sistem pendingin untuk mendinginkannya.

2.5.2 Cara Kerja SVC

SVC merupakan peralatan yang mampu bekerja dengan menyerap atau menghasilkan arus reaktif yang terkontrol dengan cara menyerap daya reaktif dari sistem atau menghasilkan daya reaktif untuk sistem. Ketika tegangan sistem rendah SVC menghasilkan daya reaktif (SVC kapasitif) namun ketika tegangan sistem tinggi SVC menyerap daya reaktif (SVC induktif).

SVC ini berfungsi untuk menyuntikkan atau menyerap daya reaktif statis yang terkontrol dan dihubungkan paralel yang mempunyai keluaran (*output*) yang bervariasi untuk mempertahankan atau mengontrol variabel tertentu pada sistem tenaga listrik, terutama tegangan bus. SVC terdiri dari TCR (*Thyristor Controlled Reactor*), TCS (*Thyristor Capacitor Switched*) dan filter. Filter berfungsi untuk mengatasi besarnya harmonisa yang dihasilkan oleh TCR.

Peralatan *static var compensator* (SVC) digunakan untuk mengkompensasi daya reaktif. SVC juga terdiri dari kapasitor, reaktor dan thyristor. Prinsip kerja *static var compensator* (SVC) yaitu dengan cara mengatur sudut penyalan thyristor, sehingga dapat mengatur keluaran daya reaktif dari SVC dan besarnya arus reaktor. Arus yang diterima oleh SVC merupakan penjumlahan dari arus kapasitor dan arus reaktor. Besarnya arus kapasitor tetap, yang dirubah adalah besarnya nilai reaktor yang tepat arus yang diterima oleh kompensator daya reaktif statis dapat divariasikan dari kapasitif hingga induktif. Nilai tegangan sistem merupakan input bagi pengendali, yang kemudian akan mengatur sudut penyalan thyristor. Dengan demikian, SVC akan memberikan kompensasi daya reaktif maupun mengambil daya reaktif yang sesuai dengan kebutuhan sistem. SVC diatur dalam mode pengaturan tegangan dengan $V_{ref} = 1 \text{ pu}$. Batas tegangan 0,03 pu berarti tegangan SVC bervariasi dari 0,97 pu sampai 1,015 pu saat arus SVC beranjak dari sepenuhnya kapasitif menjadi sepenuhnya induktif. Gambar 2.7 dibawah ini menunjukkan karakteristik *Static VAR Compensator*.



Gambar 2.7 karakteristik SVC [4]

2.6 Stabilitas Sistem Tenaga

Kestabilan sistem tenaga listrik didefinisikan sebagai kemampuan dari sistem untuk menjaga kondisi operasi yang seimbang dan kemampuan sistem tersebut untuk kembali ke kondisi operasi normal ketika terjadi gangguan. Sedangkan ketidakstabilan sistem dapat terjadi dalam berbagai bentuk, tergantung dari konfigurasi sistem dan model operasinya. Sistem akan masuk pada kondisi ketidakstabilan tegangan ketika terjadi gangguan, peningkatan beban atau pada saat terjadi perubahan kondisi sistem yang disebabkan oleh drop tegangan yang tidak terkontrol.

Penyebab utama ketidakstabilan tegangan adalah ketidak mampuan sistem tenaga untuk memenuhi permintaan daya reaktif. Inti dari permasalahan ini biasanya berhubungan dengan susut tegangan yang terjadi pada saat daya aktif dan daya reaktif mengalir melalui reaktansi induktif pada jaringan transmisi. Secara mendasar masalah kestabilan berarti menjaga sinkronisasi operasi sistem tenaga. Kestabilan pada sistem tenaga listrik merupakan masalah yang sangat penting dalam penyediaan daya kepada konsumen. Masalah kestabilan yang sering terjadi disini adalah masalah beban lebih, berkurangnya pasokan daya reaktif yang pada akhirnya akan menempatkan sistem pada kondisi *voltage collapse* dan akan terjadi kemungkinan terburuk yaitu terjadinya blackout. Ukuran fundamental untuk jarak sistem terhadap *voltage collapse* adalah *load margin* (λ).

Kestabilan tegangan biasanya termasuk saat terjadi gangguan besar (termasuk kenaikan beban / transfer daya yang sangat besar). Tegangan

akan mengalami osilasi, dan terjadi ketidakstabilan sistem kontrol. Maka dibutuhkan suatu *voltage security*, yaitu kemampuan sistem, tidak hanya untuk beroperasi secara stabil, tetapi juga stabil saat kondisi terburuk atau saat terjadi kenaikan beban.

Stabilitas sistem tenaga telah menjadi perhatian utama dalam sebuah sistem operasi. Perhatian itu muncul dari fakta bahwa pada kondisi keadaan mantap (steady-state), kecepatan rata-rata untuk semua generator harus sama. Kondisi tersebut dinamakan pada operasi sinkron dari sebuah sistem yang terinterkoneksi. Gangguan kecil atau besar pada sistem tenaga berdampak pada operasi sinkron. Sebagai contoh, kenaikan atau ketrurunan tiba-tiba pada beban, atau akibat rugi pembangkitan menjadi salah satu jenis gangguan yang berpengaruh sangat signifikan terhadap sistem. Jenis lain dari gangguan adalah jaring transmisi yang terputus, beban lebih, atau hubung singkat. Dengan demikian diharapkan stabilitas sistem akan menuju ke keadaan mantap dalam waktu singkat setelah gangguan menghilang.

2.7 Kestabilan Tegangan

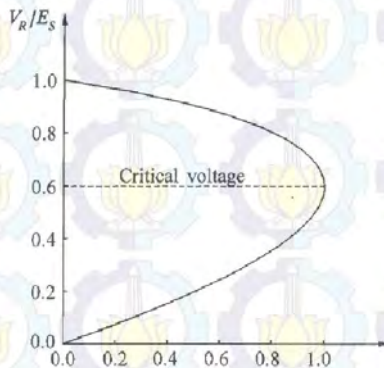
Kestabilan tegangan kini memperoleh perhatian lebih karena pesatnya perkembangan beban membuat sistem semakin terbebani [5]. Kestabilan tegangan adalah kemampuan sistem untuk menjaga tegangan sistem pada seluruh bus tetap berada dalam batas kestabilan saat kondisi normal atau setelah terjadi gangguan.[6]

Ketidakstabilan tegangan dapat terjadi karena adanya gangguan, baik gangguan kecil berupa peningkatan pembebanan ataupun gangguan besar seperti lepasnya unit pembangkit besar atau perubahan permintaan daya dalam jumlah yang besar. Ketidakstabilan tegangan dapat mengakibatkan keruntuhan tegangan, profil tegangan yang sangat rendah disebagian besar sistem yang berpotensi menimbulkan blackout pada sistem.

Pendekatan statis lebih dipilih karena memiliki kelebihan-kelebihan seperti mampu memberikan informasi tentang tingkat kestabilan tegangan sistem, jarak kondisi sistem dengan batas wilayah ketidakstabilan tegangan, serta mampu menginformasikan bus atau saluran yang menjadi penyebab sistem memasuki wilayah ketidakstabilan tegangan. Salah satu metode yang digunakan pada pendekatan statis adalah menggunakan indeks kestabilan tegangan (VSI).

2.7.1 Kriteria kestabilan tegangan

Kurva P-V diperoleh dengan cara melakukan simulasi aliran daya dimana beban mengalami perubahan. Simulasi ini akan menghasilkan nilai-nilai magnitude tegangan dan daya aktif pada suatu bus yang senantiasa berubah membentuk sebuah kurva yang berbentuk ‘hidung (nose)’. Titik balik dari kurva P-V merupakan titik kritis pembebanan atau titik pembebanan maksimum seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.8. Wilayah di atas titik kritis merupakan wilayah operasi yang masih stabil dan wilayah di bawah titik kritis merupakan wilayah operasi yang tidak stabil.



Gambar 2.8 kurva P-V

2.7.2 Mekanisme Ketidakstabilan Tegangan

Perpotongan antara kurva P-V yang menunjukkan karakteristik transmisi dan kurva karakteristik beban merupakan titik operasi sistem tenaga listrik. Perubahan pada salah satu kurva tersebut dapat mengakibatkan perubahan pada titik operasi sistem. Perubahan pada kurva P-V menunjukkan adanya perubahan pada sistem transmisi sedangkan perubahan pada kurva karakteristik beban menunjukkan adanya perubahan daya yang diserap beban. Ketidakstabilan dan runtuh tegangan dapat terjadi apabila tidak ada titik potong antara kurva P-V dengan kurva karakteristik beban keadaan tunak, dengan kata lain beban akan cenderung untuk menyerap daya lebih besar dibandingkan kemampuan sistem transmisi. Pada kondisi ini kurva karakteristik beban berada diluar kurva P-V sistem. Perubahan pada

kurva P-V dan kurva karakteristik beban dapat mendorong terjadinya mekanisme tersebut.

1) Perubahan sistem transmisi

Terjadinya perubahan pada sistem transmisi, misalnya terlepasnya salah satu saluran transmisi karena gangguan, dapat menyebabkan perubahan pada karakteristik saluran transmisi (perubahan nilai impedansi total 0. Perubahan ini menyebabkan daya yang dikirimkan menjadi lebih besar dibandingkan kemampuan saluran transmisi sehingga mendorong sistem ke dalam ketidakstabilan tegangan.

2) Perubahan beban

Kenaikan beban membuat daya yang diserap beban berada di luar batas kemampuan sistem transmisi dan menyebabkan terjadinya ketidakstabilan dan runtuh tegangan. Mekanisme terjadinya ketidakstabilan tegangan.

2.8 Optimisasi *Sequential Quadratic Programming* (SQP)^[7]

Sequential Quadratic Programming (SQP) adalah metode paling populer untuk *nonlinear constrained optimization*. Metode SQP bekerja dengan mengkonversi fungsi-fungsi umum menjadi fungsi kuadrat. Metode ini menghasilkan subproblem dari quadratic programming pada tiap iterasi, dan solusi dari subproblem ini dapat digunakan untuk menentukan nilai taksiran dari solusi di iterasi berikutnya. Jika penyelesaian awal dari sebuah fungsi dinyatakan dengan $x^{(0)}$, maka deret Taylor orde kedua dari $f(x)$ tertulis sebagai berikut.

$$q(x) = f(x^{(0)}) + \nabla f(x^{(0)})^T (x - x^{(0)}) + \frac{1}{2} (x - x^{(0)})^T \nabla^2 f(x^{(0)}) (x - x^{(0)})$$

Metode yang kita bahas pada bagian ini adalah untuk menaksir nilai *objective function* dengan fungsi kuadrat. Sedangkan nilai batasan-batasan ditaksir dengan fungsi linear. Jika hasil akhir pada iterasi ke t dari persoalan di atas dilambangkan dengan $x^{(t)}$, maka persoalan *quadratic programming* menjadi seperti di bawah ini

$$\begin{aligned} & f(x^{(t)}) + \nabla f(x^{(t)})^T (x^{(t+1)} - x^{(t)}) \quad \min \\ & + \frac{1}{2} (x^{(t+1)} - x^{(t)})^T \nabla^2 f(x^{(t)}) (x^{(t+1)} - x^{(t)}) \end{aligned}$$

dengan

$$h_k(x^{(r)}) + \nabla h_k(x^{(r)})^T (x^{(r+1)} - x^{(r)}) = 0 \quad \text{untuk } k=1,2,\dots,K$$

$$g_j(x^{(r)}) + \nabla g_j(x^{(r)})^T (x^{(r+1)} - x^{(r)}) \geq 0 \quad \text{untuk } g=1,2,\dots,J$$

Metode *SQP* digunakan untuk menaksir nilai fungsi objektif dengan fungsi kuadrat pada program *Matpower* yang dimodifikasi ke dalam *software MATLAB*.

2.9 Matpower^[8]

Matpower adalah sebuah paket dari MATLAB M-File yang berguna untuk menyelesaikan permasalahan sistem tenaga listrik. Permasalahan yang dimaksud adalah tentang studi aliran daya dan OPF. Paket ini berisi *tools* simulasi untuk para peneliti dan pelaku pendidikan yang dapat digunakan dan dimodifikasi dengan mudah. Hal ini dikarenakan Matpower memang didisain untuk memberikan hasil simulasi terbaik yang mudah dimengerti.

Matpower menyediakan *steady-state* model dari sistem kelistrikan standar yang biasanya digunakan untuk analisis aliran daya. Dalam analisi menggunakan Matpower, biasanya semua nilai dari besaran-besaran yang dianalisis dinyatakan dalam satuan per unit dan sudut dari bilangan kompleks dinyatakan dalam satuan radian. Dan biasanya semua generator dan cabang yang *offline* dihilangkan sebelum membentuk model untuk menyelesaikan problem aliran daya atau OPF. Dalam simulasi dengan Matpower semua bus diberi nomor berurutan, dimulai pada 1, dan generator disebut berdasarkan nomer bus di mana generator tersebut terhubung. Berdasarkan kelebihan dari bahasa pemrograman MATLAB dalam menangani matriks dan vektor, maka model dan persamaan yang disajikan di Matpower juga dalam matriks dan bentuk vektor.

2.9.1 OPF di dalam Matpower

Program matpower dapat menyelesaikan permasalahan AC dan DC optimal power flow. Permasalahan optimal power flow pada umumnya ditulis sebagai berikut :

$$\min_x f(x) \quad (2.18)$$

subject to

$$g(x) = 0 \quad (2.19)$$

$$h(x) \leq 0 \quad (2.20)$$

$$x_{min} \leq x \leq x_{max} \quad (2.21)$$

Optimasi vektor x terdiri dari magnitude tegangan V_m dan sudut fasa tegangan θ , daya aktif P_g dan daya reaktif injeksi Q_g , maka x dituliskan.

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ V_m \\ P_g \\ Q_g \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Fungsi objektif di OPF matpower ini adalah penjumlahan fungsi polinomial biaya dari injeksi daya aktif dan daya reaktif untuk tiap generator.

$$\min_{\theta, V_m, P_g, Q_g} \sum_{i=1}^{n_g} f_p^i(p_g^i) + f_q^i(Q_g^i) \quad (2.23)$$

Pada persamaan (2.19), fungsi g x disebut dengan *equality constraints* (batasan kesamaan) yang meliputi dua himpunan dari nb nonlinear bus persamaan keseimbangan daya, satu himpunan untuk daya aktif dan lainnya untuk daya reaktif.

$$\begin{matrix} gP & \theta & V & P \\ gQ & \theta & V & P \end{matrix}$$

Sedangkan fungsi $h(x) \leq 0$ disebut dengan *inequality constraints* (batasan ketidaksamaan) yang meliputi dua himpunan dari n_l cabang, yang mewakili fungsi non-linear batasan aliran daya pada cabang. Dalam fungsi ini mencakup besarnya tegangan dan sudut tegangan dari satu bus (h_f ke bus yang lain h_t).

$$h_f(\theta, V) \leq 0$$

$$h_t(\theta, V) \leq 0$$

Untuk batasan yang dimaksud pada persamaan $x_{min} \leq x \leq x_{max}$ meliputi:

$$\theta_{ref} \leq \theta_i \leq \theta_{ref}$$

$$v_{min} \leq v_i \leq v_{max}$$

$$P_{imin} \leq P_i \leq P_{imax}$$


$$Q_{imin} \leq Q_i \leq Q_{im}$$

$$\theta_i$$

$$v_i$$

$$P_i$$

$$Q_i$$



Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III

PENERAPAN *SEQUENTIAL QUADRATIC PROGRAMMING* PADA ALIRAN DAYA OPTIMAL

Dalam bab ini akan dijelaskan mengenai penerapan *sequential quadratic programming* untuk menyelesaikan permasalahan aliran daya optimal atau *optimal power flow* yang mempertimbangkan kestabilan tegangan dan penggunaan *static var compensator* pada suatu sistem kelistrikan. Pengolahan data dan simulasi dikerjakan dengan menggunakan *program matpower*[8] yang dimodifikasi pada *software MATLAB*.

3.1 Algoritma

Pengerjaan Tugas Akhir dimulai dengan pengumpulan data saluran, data beban serta data pembangkit pada sistem IEEE 14 bus, IEEE 30 bus dan Sistem 25 bus Jawabali yang telah dimodifikasi. Kemudian sistem tersebut dimodelkan dalam casefile menggunakan *M-file MATLAB*. Setelah itu ditentukan fungsi objektif, variabel yang dioptimasi serta batasan permasalahan dari aliran daya optimal atau *optimal power flow* (OPF). Dikarenakan perhitungan *OPF* disini mempertimbangkan kestabilan tegangan dan juga penggunaan *static var compensator*, maka perhitungan dilakukan dalam dua kondisi yaitu saat *operating point* dan *collapse point*. Kondisi pertama ,yaitu saat *operating point* dimana total beban adalah beban awal yang telah ditentukan. Dan untuk kondisi kedua yaitu beban dinaikkan sebesar beberapa *percent* dari total beban awal. Untuk kenaikan beban pada kondisi kedua digunakan *load margin* (λ) yang dirumuskan:

$$P_c = (1 + \lambda) \times P_o$$

Dimana:

P_o = beban saat kondisi awal

P_c = beban saat kondisi kedua

λ = *load margin*

Load margin adalah suatu ukuran atau jarak sistem terhadap *voltage collapse*[2]. Dan juga dilakukan pemasangan *static var compensator* (SVC) pada beberapa bus yang terpilih. SVC pada tugas

akhir ini disimulasikan sebagai generator yang hanya mensupai daya reaktif saja. Penambahan SVC ini dilakukan agar dapat terlihat pengaruh dari penggunaan SVC pada suatu sistem tenaga listrik. Kemudian dilakukan perbandingan terhadap hasil perhitungan OPF untuk masing-masing kondisi. Perbandingan meliputi hasil pembangkitan dan biaya pembangkitan. Dari hasil perbandingan dianalisis dan disimpulkan sebagai kesimpulan dalam Tugas Akhir.

3.2 Sequential Quadratic Programming (fmincon)

Sequential Quadratic Programming (SQP) merupakan salah satu metode iterative untuk optimasi nonlinier dimana metode ini menggunakan pendekatan Lagrange dan Newton tanpa harus mengkonversikan ke barisan persoalan minimisasi yang tidak berkendala. Metode SQP bekerja dengan mengkonversi persoalan nonlinier menjadi bentuk persoalan pemrograman kuadratik. Metode ini menghasilkan subproblem dari quadratic programming pada tiap iterasi, dan solusi dari subproblem ini dapat digunakan untuk menentukan nilai taksiran dari solusi di iterasi berikutnya.

3.2.1 Sintaksis Sequential Quadratic Programming (fmincon)

- $x = \text{fmincon}(\text{fun}, x_0, A, b)$
Untuk meminimalkan fungsi x dengan nilai awal x_0 yang diuraikan dalam fungsi fun pada inequality constraints linear $A^*x \leq b$, dimana x_0 akan menjadi skalar, vector, atau matrix.
- $x = \text{fmincon}(\text{fun}, x_0, A, b, Aeq, beq)$
Meminimalkan subjek fun ke equality constraints linear $Aeq^*x = beq$ dan $A^*x \leq b$. Jika tidak ada inequalities, maka $A = []$ dan $B = []$.
- $x = \text{fmincon}(\text{fun}, x_0, A, b, Aeq, beq, lb, ub)$
Mendefinisikan batas bawah dan batas atas dalam variabel x , sehingga solusinya akan selalu dalam batasan $lb \leq x \leq ub$. Jika ada equality yang tidak mempunyai batasan, maka $Aeq = []$ dan $beq = []$, dan jika lb tidak terbatas diseting $lb = -inf$ begitu juga untuk ub .
- $x = \text{fmincon}(\text{fun}, x_0, A, b, Aeq, beq, lb, ub, nonlcon)$
Meminimalkan inequality constraints nonlinear $c(x)$ atau equality constraints $CEQ(x)$ yang di definisikan dalam

nonlcon. `fmincon` mengoptimalkan sedemikian rupa sehingga $c(x) \leq 0$ dan $CEQ(x) = 0$.

- $x = \text{fmincon}(\text{fun}, x_0, A, b, Aeq, beq, lb, ub, \text{nonlcon}, \text{options})$
Meminimalkan dengan optimasi *option* yang ditentukan dalam struktur *option*, dengan optimset untuk setingan *option*. Jika tidak terdapat batasan *equality constraints* dan *inequality constraints* maka `nonlcon` = [].
- $x = \text{fmincon}(\text{problem})$
Mendapatkan nilai minimum untuk *problem*, dimana struktur *problem* dijelaskan dalam *input argument*.
- $[x, fval] = \text{fmincon}(\dots)$
Mengembalikan nilai objektif dari fungsi *fun* pada solusi *x*.
- $[x, fval, \text{exitflag}] = \text{fmincon}(\dots)$
Mengisikan kembali nilai *exitflag* yang mendeskripsikan kondisi keluaran *fmincon*.
- $[x, fval, \text{exitflag}, \text{output}] = \text{fmincon}(\dots)$
Mengisikan kembali stuktur keluaran dengan informasi tentang optimasi.
- $[x, fval, \text{exitflag}, \text{output}, \text{lambda}] = \text{fmincon}(\dots)$
Mengisikan kembali stuktur *lambda* dengan bagian yang berisi pengali *Lagrange* sebagai solusi *x*.
- $[x, fval, \text{exitflag}, \text{output}, \text{lambda}, \text{grad}] = \text{fmincon}(\dots)$
Mengisikan kembali nilai *gradient* sebagai solusi *x*.
- $[x, fval, \text{exitflag}, \text{output}, \text{lambda}, \text{grad}, \text{hessian}] = \text{fmincon}(\dots)$
Mengisikan kembali nilai nilai dari *hessian* sebagai solusi *x*.

3.2.2 Input Argumen dari *Sequential Quadratic Programming (fmincon)*

- Fun** Sebuah fungsi yang dimaksimalkan dan merupakan fungsi yang diisikan fektor *x* kemudian mengembalikan skalar *f* yang fungsi tujuan dievaluasi pada *x*. Pada penulisannya di MATLAB *myfun*.
- x₀** *Optional*. Vektor yang menyatakan *initial point* dari algoritma *fmincon*.
- Aineq** Matrik yang menyatakan koefisien linier dari *inequality constraints* $A * x \leq b$.
- bineq** Vektor yang menyatakan vector konstan pada *inequality constraints* $A * x \leq b$.

- Aeq Matrik yang menyatakan koefisien linier dari *equality constraints* $Aeq * x = beq$.
- Beq Vektor yang menyatakan vector konstan dari *equality constraints* $Aeq * x = beq$.
- Lb Vektor yang menyatakan batas bawah dari permasalahan $lb \leq x \leq ub$.
- Ub Vektor yang menyatakan batas atas dari permasalahan $lb \leq x \leq ub$.
- Nonlcon fungsi untuk batasan *nonlinier*.

3.2.3 Sequential Quadratic Programming pada OPF

Pada tugas akhir ini, SQP menggunakan program *Matpower* yang sudah di modifikasi pada *software MATLAB*.

3.2.3.1 Inisialisasi Permasalahan OPF

Cost function sebagai persamaan kuadratik

$$F_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (3.1)$$

P_i adalah daya keluaran dari unit ke- i dan

a_i, b_i dan c_i adalah *cost coefficient* unit generator ke- i maka,

$$\text{minimize } C = \sum_{i=1}^K \sum_{i=1}^N F_i(P_{ik}) \quad (3.2)$$

Subject to

- *Equality constraint*

Equality constraint dari permasalahan *optimal power flow* ditunjukkan pada persamaan:

$$P_i^t = P_{gi}^t - P_{di}^t = \sum_{j=1}^n V_i^t V_j^t (G_{ij} \cos \theta_{ij}^t + B_{ij} \sin \theta_{ij}^t) \quad (3.3)$$

$$Q_i^t = Q_{gi}^t - Q_{di}^t = \sum_{j=1}^n V_i^t V_j^t (G_{ij} \sin \theta_{ij}^t - B_{ij} \cos \theta_{ij}^t) \quad (3.4)$$

Dimana $i = 1, 2, \dots, n$ dan $\theta_{ij}^t = \theta_i^t - \theta_j^t$, yang menyatakan sudut tegangan dari dua bus yang berubah-ubah pada setiap saluran, dan n di representasikan sebagai jumlah bus, P_i^t dan Q_i^t adalah injeksi daya aktif dan reaktif di bus i . P_{gi}^t dan Q_{gi}^t adalah pembangkitan daya aktif dan reaktif pada generator ke- i , sedangkan untuk P_{di}^t dan Q_{di}^t adalah

pembangkitan daya aktif dan reaktif pada beban ke- i . G_{ij} dan B_{ij} juga didefinisikan sebagai:

$Y_{ij} \angle \theta_{ij} = G_{ij} - jB_{ij}$, dimana Y_{ij} adalah elemen matrik admitansi ke- ij .

- *Inequality constraint*

Inequality constraint dari permasalahan *optimal power flow* ditunjukkan pada persamaan

$$P_{gi \min} \leq P_{gi}^t \leq P_{gi \max} \quad (3.5)$$

$$Q_{gi \min} \leq Q_{gi}^t \leq Q_{gi \max} \quad (3.6)$$

$$V_{i \min} \leq V_i^t \leq V_{i \max}, i = 1, 2, \dots, N_{bus} \quad (3.7)$$

$$|P_{ij}^t| \leq P_{ij \max} \quad (3.8)$$

dimana P_{ij}^t adalah daya yang mengalir antara bus i dan bus j . V_i^t adalah tegangan amplitudo pada bus i , $V_{i \min}$ dan $V_{i \max}$ adalah tegangan minimum dan maksimum dari tiap bus. $P_{ij \max}$ adalah daya maksimum yang melewati saluran. P_{gimin} dan P_{gimax} adalah daya aktif minimum dan maksimum pada generator ke- i , sedangkan Q_{gimin} dan Q_{gimax} adalah daya reaktif minimum dan maksimum pada generator ke- i .

3.2.3.2 Inisialisasi x_0 Sebagai Nilai Awal

Dalam pemograman optimasi dengan fungsi *fmincon* membutuhkan input argumen x_0 sebagai nilai awal. Variabel x_0 terdiri dari sudut tegangan, magnitudo tegangan, daya aktif dan reaktif. Misal dengan sistem 2 generator ($ng=2$), 3 bus ($nb=3$). Maka matrik x_0 dapat ditulis pada persamaan berikut:

$$x_0 = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ p_{g1} \\ p_{g2} \\ Q_{g1} \\ Q_{g2} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Sedangkan untuk 2 kondisi dimana beban kondisi kedua lebih besar dari beban awal, maka ukuran matrik x_0 dimodifikasi menjadi:

$$x_0 = \begin{bmatrix} \theta_1 \text{ o} \\ \theta_2 \text{ o} \\ \theta_3 \text{ o} \\ v_1 \text{ o} \\ v_2 \text{ o} \\ v_3 \text{ o} \\ p_{g1} \text{ o} \\ p_{g2} \text{ o} \\ Q_{g1} \text{ o} \\ Q_{g2} \text{ o} \\ \vdots \\ \theta_1 \text{ c} \\ \theta_2 \text{ c} \\ \theta_3 \text{ c} \\ v_1 \text{ c} \\ v_2 \text{ c} \\ v_3 \text{ c} \\ p_{g1} \text{ c} \\ p_{g2} \text{ c} \\ Q_{g1} \text{ c} \\ Q_{g2} \text{ c} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Kondisi awal
Kondisi kedua

x_0 merupakan nilai awal untuk memulai proses pencarian variable yang dioptimasi.

3.2.3.3 Pembentukan fungsi objektif F dan DF

F adalah nilai biaya pembangkitan sedangkan DF adalah turunan dari fungsi pembangkitan. Nilai F akan dijumlahkan pada setiap level beban dan dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$F = \sum_{i=1}^{jam} F_i \quad (3.12)$$

Misal dengan sistem 3 generator ($ng=3$) dan 4 bus ($nb=4$) maka ukuran matrik DF sebagai berikut :

$$DF = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{dP_{g1}}{dF} \\ \frac{dP_{g2}}{dF} \\ \frac{dP_{g3}}{dF} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Sedangkan untuk OPF dengan dua kondis yaitu saat *operating point* dan *collapse point*, maka ukuran matrik DF menjadi dua kali lipat dimana bila saat satu kondisi ukuran matrik 1 by 10 ,maka matrik DF dengan dua kondisi menjadi 1 by 20 yang direpresentasikan berikut:

$$\mathbf{DF} = \begin{bmatrix} 0_1 \\ 0_1 \\ 0_1 \\ 0_1 \\ 0_1 \\ 0_1 \\ \frac{dF}{dP_{g1_1}} \\ \frac{dF}{dP_{g2_1}} \\ 0_1 \\ 0_1 \\ \vdots \\ 0_c \\ 0_c \\ 0_c \\ 0_c \\ 0_c \\ 0_c \\ \frac{dF}{dP_{g1_c}} \\ \frac{dF}{dP_{g2_c}} \\ 0_c \\ 0_c \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{Kondisi awal} \\ \text{Kondisi kedua} \end{array} \quad (3.14)$$

3.2.3.4 Pembentukan Equality Constraint Berupa Matrik \mathbf{g} dan \mathbf{dg}

Equality Constraint dalam permasalahan *optimal power flow* dijadikan dalam suatu matrik \mathbf{g} dan \mathbf{dg} , dimana \mathbf{g} dan \mathbf{dg} disebut sebagai *power balance*. Misal dengan sistem 2 generator ($ng=2$), 3 bus ($nb=3$). Maka ukuran matrik awal dari \mathbf{g} sebagai berikut:

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} P_{L1} \\ \vdots \\ P_{L3} \\ Q_{L1} \\ \vdots \\ Q_{L3} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Sedangkan untuk *OPF* dengan dua kondisi yaitu saat *operating point* dan *collapse point*, maka ukuran matrik \mathbf{g} menjadi dua kali lipat dimana bila saat satu kondisi ukuran matrik $[nb: 1]$, maka matrik \mathbf{g} dengan dua kondisi menjadi $[2*nb: 1]$, maka matrik tersebut dimodifikasi menjadi :

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} P_{L1\ 1} \\ \vdots \\ P_{L3\ 1} \\ Q_{L1\ 1} \\ \vdots \\ Q_{L3\ 1} \\ \vdots \\ P_{L1\ t} \\ \vdots \\ P_{L3\ t} \\ Q_{L1\ t} \\ \vdots \\ Q_{L3\ t} \end{bmatrix} \quad \left. \begin{array}{l} \left. \begin{array}{l} P_{L1\ 1} \\ \vdots \\ P_{L3\ 1} \end{array} \right\} \text{Beban daya aktif kondisi awal} \\ \left. \begin{array}{l} Q_{L1\ 1} \\ \vdots \\ Q_{L3\ 1} \end{array} \right\} \text{Beban daya reaktif kondisi awal} \\ \left. \begin{array}{l} P_{L1\ t} \\ \vdots \\ P_{L3\ t} \end{array} \right\} \text{Beban daya aktif kondisi kedua} \\ \left. \begin{array}{l} Q_{L1\ t} \\ \vdots \\ Q_{L3\ t} \end{array} \right\} \text{Beban daya reaktif kondisi kedua} \end{array} \right\} \quad (3.16)$$

Untuk $d\mathbf{g}$ adalah turunan dari \mathbf{g} , pada matrik $d\mathbf{g}$ untuk setiap bagian diturunkan terhadap bagian tersebut, maka bagian yang lain menjadi nol, bila dimisalkan b adalah jumlah pembangkitan setiap bus, maka matriknya akan digambarkan sebagai berikut:

$$\begin{array}{c}
 \text{aktif power balance} \quad \text{reaktif power balance} \\
 dg = \begin{bmatrix}
 \frac{geq}{d\theta_{11}} & \dots & \frac{geq}{d\theta_{1b}} & \frac{geq}{d\theta_{11}} & \dots & \frac{geq}{d\theta_{1b}} \\
 \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 \frac{geq}{d\theta_{n1}} & \dots & \frac{geq}{d\theta_{nb}} & \frac{geq}{d\theta_{n1}} & \dots & \frac{geq}{d\theta_{nb}} \\
 \frac{G}{G} & \dots & \frac{G}{G} & \frac{geq}{geq} & \dots & \frac{geq}{geq} \\
 \frac{dVm_{11}}{dVm_{11}} & \dots & \frac{dVm_{1b}}{dVm_{11}} & \dots & \dots & \frac{dVm_{1b}}{dVm_{1b}} \\
 \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 \frac{geq}{dVm_{n1}} & \dots & \frac{geq}{dVm_{nb}} & \frac{geq}{dVm_{n1}} & \dots & \frac{geq}{dVm_{nb}} \\
 \frac{geq}{dPg_{11}} & \dots & \frac{geq}{dPg_{1b}} & \frac{geq}{dPg_{11}} & \dots & \frac{geq}{dPg_{1b}} \\
 \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 \frac{geq}{dPg_{n1}} & \dots & \frac{geq}{dPg_{nb}} & \frac{geq}{dPg_{n1}} & \dots & \frac{geq}{dPg_{nb}} \\
 \frac{geq}{dQ_{g11}} & \dots & \frac{geq}{dQ_{gnb}} & \frac{geq}{dQ_{g11}} & \dots & \frac{geq}{dQ_{gnb}} \\
 \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 \frac{geq}{dQ_{gn1}} & \dots & \frac{geq}{dQ_{gnb}} & \frac{geq}{dQ_{gn1}} & \dots & \frac{geq}{dQ_{gnb}}
 \end{bmatrix}
 \end{array} \quad (3.17)$$

Sedangkan untuk dua kondisi maka ukuran matrik **dg** adalah :
 $[\{ 2(nb+ng) \} : \{ 2*nb \}]$, , maka matrik tersebut dimodifikasi menjadi :

$$dg = \begin{bmatrix} dg_o & 0 \\ 0 & dg_c \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Dimana:

dg_o= matrik **dg** saat keadaan awal (*operating point*)

dg_c = matrik **dg** saat kondisi kedua (beban naik (1+λ) beban awal)

3.2.3.5 Pembentukan Inequality Constraint berupa matrik **h** dan **dh**

Inequality Constraint dalam permasalahan *optimal power flow* dijadikan dalam matrik **h** dan **dh**, dimana **h** dan **dh** disebut sebagai *power branch flow* yaitu batasan aliran daya pada saluran yaitu *from bus limit* dan *to bus limit*. Misal dengan sistem 3 generator (*ng*=3), 4 bus (*nb*=4) dan 2 saluran (*nbr*=2) Maka ukuran matrik awal dari **h** sebagai berikut:

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

dengan F adalah *from bus flow* dan T adalah *to bus flow*. Untuk *OPF* dengan dua kondisi yaitu saat *operating point* dan *collapse point*, maka ukuran matrik \mathbf{h} menjadidua kali lipat dimana bila saat satu kondisi ukuran matrik $[nb: 1]$, maka matrik \mathbf{h} dengan dua kondisi menjadi $[2*nb: 1]$, maka matrik tersebut dimodifikasi menjadi :

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} F_{1o} \\ F_{2o} \\ F_{3o} \\ T_{1o} \\ T_{2o} \\ T_{3o} \\ \vdots \\ F_{1c} \\ F_{2c} \\ F_{3c} \\ T_{1c} \\ T_{2c} \\ T_{3c} \end{bmatrix} \begin{array}{l} \left. \begin{array}{l} F_{1o} \\ F_{2o} \\ F_{3o} \end{array} \right\} \text{From bus kondisi awal} \\ \left. \begin{array}{l} T_{1o} \\ T_{2o} \\ T_{3o} \end{array} \right\} \text{To bus kondisi awal} \\ \left. \begin{array}{l} \vdots \end{array} \right\} \\ \left. \begin{array}{l} F_{1c} \\ F_{2c} \\ F_{3c} \end{array} \right\} \text{From bus kondisi 2} \\ \left. \begin{array}{l} T_{1c} \\ T_{2c} \\ T_{3c} \end{array} \right\} \text{To bus kondisi 2} \end{array} \quad (3.20)$$

Sedangkan untuk $d\mathbf{h}$ adalah turunan dari \mathbf{h} , bila nbr adalah jumlah saluran maka matrik dg sebagai berikut:

$$\begin{array}{c}
\text{aktif power branch} \quad \text{reaktif power branch} \\
\mathbf{dh} = \begin{bmatrix} \frac{h}{d\theta_{11}} & \cdots & \frac{h}{d\theta_{1(nbr)}} & \frac{h}{d\theta_{11}} & \cdots & \frac{h}{d\theta_{1(nbr)}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{h}{d\theta_{n1}} & \cdots & \frac{h}{d\theta_{n(nbr)}} & \frac{h}{d\theta_{n1}} & \cdots & \frac{h}{d\theta_{n(nbr)}} \\ \frac{h}{dVm_{11}} & \cdots & \frac{h}{dVm_{1(nbr)}} & \frac{h}{dVm_{11}} & \cdots & \frac{h}{dVm_{1(nbr)}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{h}{dVm_{n1}} & \cdots & \frac{h}{dVm_{n(nbr)}} & \frac{h}{dVm_{n1}} & \cdots & \frac{h}{dVm_{n(nbr)}} \\ \frac{h}{dPg_{11}} & \cdots & \frac{h}{dPg_{1(nbr)}} & \frac{h}{dPg_{11}} & \cdots & \frac{h}{dPg_{1(nbr)}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{h}{dPg_{n1}} & \cdots & \frac{h}{dPg_{n(nbr)}} & \frac{h}{dPg_{n1}} & \cdots & \frac{h}{dPg_{n(nbr)}} \\ \frac{h}{dP_{Q11}} & \cdots & \frac{h}{dP_{Q1(nbr)}} & \frac{h}{dP_{Q11}} & \cdots & \frac{h}{dP_{Q1(nbr)}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{h}{dP_{Qn1}} & \cdots & \frac{h}{dP_{Qn(nbr)}} & \frac{h}{dP_{Qn1}} & \cdots & \frac{h}{dP_{Qn(nbr)}} \end{bmatrix} \quad (3.21)
\end{array}$$

Sedangkan untuk dua kondisi maka ukuran matrik \mathbf{dh} adalah :
 $[\{2(nb+ng)\}: \{2*nb\}]$, , maka matrik tersebut dimodifikasi menjadi :

$$\mathbf{dh} = \begin{bmatrix} \mathbf{dh}_o & 0 \\ 0 & \mathbf{dh}_c \end{bmatrix}$$

Dimana:

\mathbf{dh}_o = matrik \mathbf{dh} saat keadaan awal (*operating point*)

\mathbf{dh}_c = matrik \mathbf{dh} saat kondisi kedua (beban naik $(1+\lambda)$ beban awal)

3.2.3.6 Pembentukan Vektor lb dan ub yang Menyatakan Batas Atas dan Bawah dari Variabel yang dioptimasi

Variable x merupakan variable yang dioptimasi yang terdiri dari sudut tegangan, magnitude tegangan, daya aktif, dan daya reaktif.

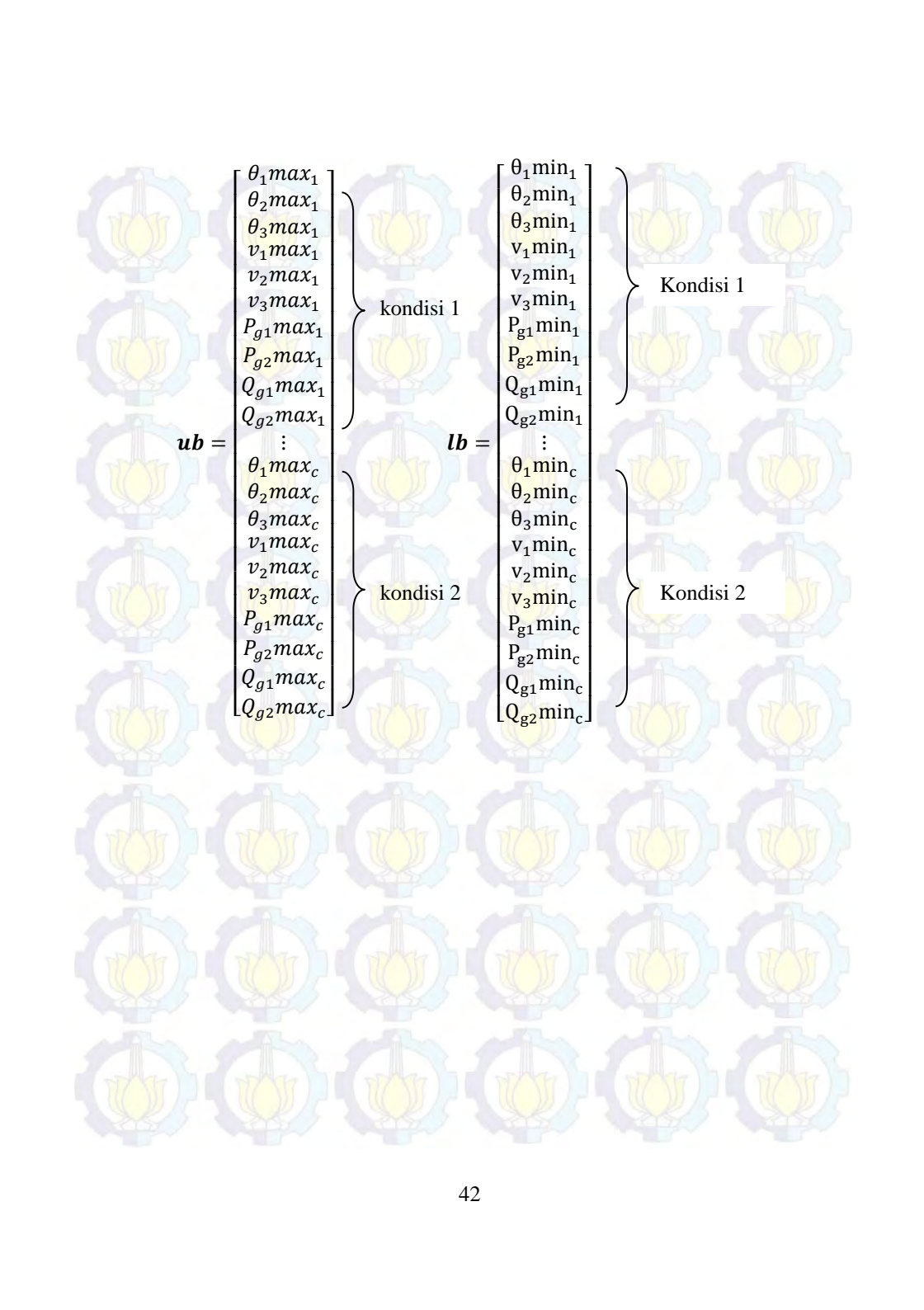
$$\mathbf{lb} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{ub} \quad (3.22)$$

Ukuran matrik lb dan ub adalah : $[2(nb+ng):1]$, dengan ng adalah jumlah generator dan nb adalah jumlah bus, misal sistem dengan 2

generator ($ng = 2$) dan dua bus ($nb = 3$). Maka batas atas dan batas bawah dari permasalahan *optimal power flow* tersebut masing masing ditunjukkan pada persamaan berikut :

$$ub = \begin{bmatrix} \theta_1 max \\ \theta_2 max \\ \theta_3 max \\ v_1 max \\ v_2 max \\ v_3 max \\ P_{g1} max \\ P_{g2} max \\ Q_{g1} max \\ Q_{g2} max \end{bmatrix} \quad lb = \begin{bmatrix} \theta_1 min \\ \theta_2 min \\ \theta_3 min \\ v_1 min \\ v_2 min \\ v_3 min \\ P_{g1} min \\ P_{g2} min \\ Q_{g1} min \\ Q_{g2} min \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Sedangkan untuk dua kondisi maka ukuran matriks ub dan lb dimodifikasi menjadi persamaan berikut:



$$\begin{aligned}
 \mathbf{ub} = & \left[\begin{array}{c} \theta_1 \max_1 \\ \theta_2 \max_1 \\ \theta_3 \max_1 \\ v_1 \max_1 \\ v_2 \max_1 \\ v_3 \max_1 \\ P_{g1} \max_1 \\ P_{g2} \max_1 \\ Q_{g1} \max_1 \\ Q_{g2} \max_1 \\ \vdots \\ \theta_1 \max_c \\ \theta_2 \max_c \\ \theta_3 \max_c \\ v_1 \max_c \\ v_2 \max_c \\ v_3 \max_c \\ P_{g1} \max_c \\ P_{g2} \max_c \\ Q_{g1} \max_c \\ Q_{g2} \max_c \end{array} \right] \quad \left. \begin{array}{c} \text{kondisi 1} \\ \text{kondisi 2} \end{array} \right\} \\
 \mathbf{lb} = & \left[\begin{array}{c} \theta_1 \min_1 \\ \theta_2 \min_1 \\ \theta_3 \min_1 \\ v_1 \min_1 \\ v_2 \min_1 \\ v_3 \min_1 \\ P_{g1} \min_1 \\ P_{g2} \min_1 \\ Q_{g1} \min_1 \\ Q_{g2} \min_1 \\ \vdots \\ \theta_1 \min_c \\ \theta_2 \min_c \\ \theta_3 \min_c \\ v_1 \min_c \\ v_2 \min_c \\ v_3 \min_c \\ P_{g1} \min_c \\ P_{g2} \min_c \\ Q_{g1} \min_c \\ Q_{g2} \min_c \end{array} \right] \quad \left. \begin{array}{c} \text{Kondisi 1} \\ \text{Kondisi 2} \end{array} \right\}
 \end{aligned}$$

BAB IV SIMULASI DAN ANALISIS

Pada pengerjaan tugas akhir ini untuk menghitung aliran daya optimal atau *optimal power flow (OPF)* digunakan program *MATLAB* dan simulasi *Matpower* yang telah dimodifikasi sesuai dengan kebutuhan pengerjaan tugas akhir. Simulasi yang dilakukan menggunakan Sistem IEEE 14 bus, Sistem IEEE 30 bus dan juga Sistem 25 bus Jawabali yang telah dimodifikasi. *OPF* dihitung pada dua kondisi sekaligus yaitu saat kondisi awal dimana beban awal sudah ditentukan kemudian untuk kondisi kedua dimana beban diperbesar $(1 + \lambda)$ dari beban awal.

4.1 Sistem IEEE 14 Bus

Program aliran daya optimal, yang selanjutnya disebut *optimal power flow (OPF)* menggunakan *sequential quadratic programming* yang telah dibuat berdasarkan penjelasan serta alur sesuai dengan bab sebelumnya. Dikarenakan perhitungan *optimal power flow* pada tugas akhir ini mempertimbangkan kestabilan tegangan dan penggunaan *static var compensator*, maka perhitungan *OPF* dilakukan dalam dua kondisi sekaligus yaitu saat kondisi awal dimana beban awal sudah ditentukan kemudian dan kondisi kedua dimana beban dinaikkan sesuai dengan *load margin*.

$$P_{Dc} = (1 + \lambda) \times P_{Do}$$

Dimana:

P_{Do} = beban saat kondisi awal

P_{Dc} = beban saat kondisi kedua

λ = *Load Margin*

Load margin adalah suatu ukuran atau jarak kedekatan fundamental suatu sistem terhadap *voltage collapse*[2]. $\lambda_{\max} = 0,2$ berarti sistem dapat menanggung maksimal peningkatan beban sebesar 20% dari beban awal[9]. Sehingga bisa dikatakan apabila sistem memiliki *load margin* yang lebih besar berarti sistem tersebut memiliki kestabilan tegangan yang lebih baik. Sedangkan untuk mengetahui pengaruh dan manfaat dari penggunaan *static var compensator* pada sistem tenaga listrik. Maka ditambahkan *SVC* pada beberapa bus di sistem IEEE 14

bus. Total beban awal sistem IEEE 14 bus adalah 259 MW dan 73.5 MVar. Data yang digunakan untuk simulasi sistem IEEE 14 bus dapat dilihat selengkapnya dilampiran.

4.1.1 Pengujian Tahap 1 Sistem IEEE 14 bus

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh penggunaan *static var compensator* terhadap *load margin* (λ) atau terhadap peningkatan beban. Pengujian ini dilakukan di *matpower* untuk menghitung *OPF* pada pada sistem IEEE 14 bus yang telah dimodifikasi. pengujian ini dilakukan 3 kali. pertama tanpa SVC, kedua dengan satu SVC dan ketiga dengan 2 SVC. Pada pengujian ini akan terlihat pengaruh SVC terhadap *maximum load margin* Sistem IEEE 14 bus.

Tabel 4.1 Penempatan SVC pada Sistem IEEE 14 bus

Pengujian	SVC	Bus	Kapasitas (MVar)
P1	-	-	-
P2	1 SVC	10	10
P3	2 SVC	10&13	10&10

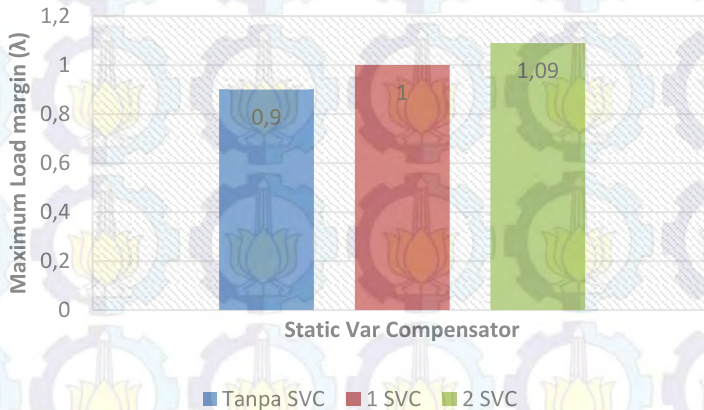
Tabel 4.2 Data hasil simulasi pengujian tahap 1 pada Sistem IEEE 14 bus

Pengujian	P1	P2	P3
SVC	-	1 SVC	2 SVC
Load margin max	0,9	1	1,09
Peningkatan Maksimal Beban	90%	100%	109%

4.1.1.1 Analisa Pengujian Tahap 1 Sistem IEEE 14 bus

Berdasarkan data hasil simulasi pengujian tahap 1. Bisa terlihat bahwa semakin banyak penggunaan *static var compensator* pada suatu sistem tenaga listrik dapat membuat maksimum *load margin* sistem semakin besar. Ini dikarenakan adanya injeksi var dari SVC sehingga mengkoreksi power faktor sistem menjadi semakin baik sehingga rugi2 daya berkurang dan penyaluran energi listrik lebih efisien. Dengan bertambahnya *load margin* sistem Berarti bahwa sistem tersebut

semakin bisa menanggulangi peningkatan beban dan juga sistem semakin stabil, dikarenakan jarak terhadap *voltage collapse* semakin jauh.



Gambar 4.1 Pengaruh SVC terhadap λ pada Sistem IEEE 14 bus

Bisa dilihat pada Gambar 4.1 dimana saat tidak ada penambahan *static var compensator* maksimum *load margin* adalah 0,9. Itu berarti bahwa sistem hanya mampu menahan maksimum peningkatan beban sebesar:

$$\begin{aligned} \text{peningkatan beban } (\%) &= (\lambda) \times 100\% = (0,9) \times 100\% \\ &= 90 \% \text{ dari beban awal.} \end{aligned}$$

Dan untuk sistem dengan penambahan satu SVC di bus 10, maksimum *load margin* yaitu 1 berarti maksimum peningkatan beban yang dapat ditanggung sistem adalah:

$$\begin{aligned} \text{peningkatan beban } (\%) &= (\lambda) \times 100\% = (1) \times 100\% \\ &= 100 \% \end{aligned}$$

Beban maksimal yang dapat ditanggung Sistem IEEE 14 bus dengan SVC di bus 10 adalah duakali beban awal. Atau 10 % lebih dari saat tidak menggunakan SVC. Bila menggunakan dua SVC maka

maksimum *load margin* menjadi 1,09 atau sistem dapat menanggung maksimum peningkatan beban sebesar 109% dari beban awal atau 19 % lebih banyak dari pada saat tidak menggunakan *SVC*. Maka bisa dilihat dari hasil simulasi pengujian tahap 1 bahwa penggunaan *SVC* dapat membantu sistem dalam meningkatkan maksimum *load margin* sistem. Yang berarti menjauhkan sistem dari *Volatge collapse*. Dan juga membuat sistem dapat menanggulangi peningkatan beban yang berlebih tanpa harus menambahkan pembangkit tambahan, selama peningkatan beban tersebut tidak melebihi maksimum *load margin*. Semakin besar nilai *load margin* berarti sistem bisa dikatakan lebih stabil.

4.1.2 Pengujian Tahap 2 Sistem IEEE 14 bus

Pengujian tahap 2 adalah pengujian pengaruh penggunaan *static var compensator* terhadap biaya optimal pembangkitan tenaga listrik pada suatu sistem tenaga listrik atau bisa dikatakan pengaruh *SVC* terhadap fungsi objektif dari perhitungan *OPF*.

Pengujian ini dilakukan pada sistem IEEE 14 bus yang dimodifikasi dengan *load margin* (λ) = 0,8 atau beban sebesar 466.2 MW dan 132.3 MVar. Pengujian dilakukan tiga kali yaitu saat tanpa *SVC*, dengan satu *SVC* di bus 10 dan yang terakhir dengan dua *SVC* di bus 10 dan 13. Hasil pengujian tahap 2 ini dituliskan pada tabel 4.3 berikut:

Tabel 4.3 Data hasil pengujian tahap 2 Sistem IEEE 14 bus

Pengujian		P1	P2	P3
BUS	SVC	tanpa SVC	1 SVC	2 SVC
1	Pg	207,32	2,0795	208,09
2		39,62	39,6	39,56
3		100	100	100
6		54,5	0,5119	48,71
8		76,51	0,7888	81,06
10	SVC	0	0	0
13		0	0	0
1	Qg	9,15	0	0

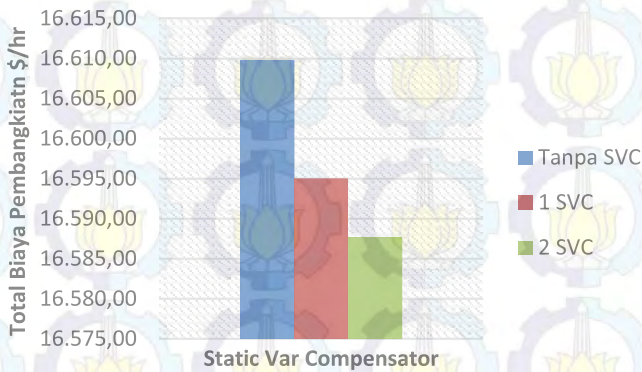
Tabel 4.4 Data hasil pengujian tahap 2 Sistem IEEE 14 bus (Lanjutan)

Pengujian		P1	P2	P3
BUS	SVC	tanpa SVC	1 SVC	2 SVC
2	Qg	50	46,65	39,83
3		40	40	40
6		24	24	22,09
8		24	24	22,12
10	SVC	0	10	10
13		0	0	10
Total Pg		477,95	477,62	477,42
Total Qg		147,15	134,65	124,04
Total Loss P		11,762	11,42	11,219
Total Loss Q		57,41	56,09	55,86
Biaya \$/hr		16.609,81	16.594,98	16.587,67

4.1.2.1 Analisis Pengujian Tahap 2 Sistem IEEE 14 bus

Berdasarkan data pengujian tahap dua bisa dilihat bahwa penggunaan SVC dapat menurunkan biaya pembangkitan yang berarti menurunkan biaya operasi sistem tenaga listrik. Biaya operasi sistem tenaga listrik turun dikarenakan adanya injeksi var tambahan oleh SVC sehingga var yang harus diinjeksikan generator berkurang dan juga dengan adanya SVC di beberapa bus beban, injeksi var oleh SVC mengoreksi power faktor sistem sehingga mengurangi rugi2 daya dan membuat sistem lebih efisien.

Pada Gambar 4.2 terlihat untuk sistem dengan *load margin* yang sama yaitu 0,8 atau beban sebesar 180% dari beban awal yaitu 466.2 MW dan 132.3 MVar. Bila tanpa menggunakan SVC, total biaya optimum untuk pembangkitan pada sistem IEEE 14 bus adalah 16.609,8082 \$/hr. Bila ditambahkan satu SVC pada sistem di bus 10 dengan kapasitas maksimum 10 Mvar total biaya pembangkitan menjadi 16.594,9831 \$/hr.



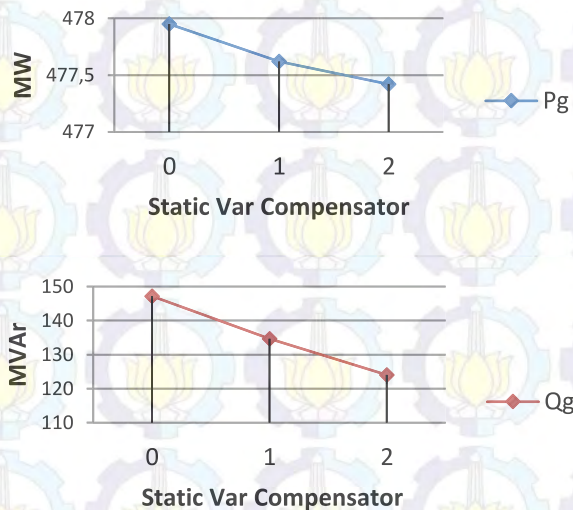
Gambar 4.2 Pengaruh SVC Pada Biaya pada Sistem IEEE 14 dengan $\lambda_{\max}=0,8$

Berarti dapat menghemat biaya pembangkitan sebesar:

$$\begin{aligned}
 \text{Penghematan Biaya} &= \text{Biaya tanpa SVC} - \text{biaya dengan SVC} \\
 &= 16.609,8082 \text{ \$/hr} - 16.594,9831 \text{ \$/hr} \\
 &= 14,8251 \text{ \$/hr}
 \end{aligned}$$

Bila ditambahkan dua SVC pada sistem di bus 10 dan 13 dengan kapasitas yang sama yaitu 10 MVar. Maka total biaya pembangkitan optimum sistem menjadi 16.587,6699 \$/hr. Yang berarti menghemat biaya pembangkitan sebesar 22,1383 \$/hr. Jadi bisa dilihat bahwa penggunaan *static var compensator* dapat menurunkan biaya pembangkitan pada sistem tenaga listrik.

Pada pengujian tahap kedua ini, terlihat bahwa dengan penambahan SVC, jumlah injeksi daya oleh generator juga menurun, baik daya aktif (MW) ataupun daya reaktif (MVar). Penurunan daya injeksi generator disebabkan oleh losses yang menurun dikarenakan kompensasi var oleh SVC.



Gambar 4.3 Pengaruh SVC terhadap P & Q generator pada Sistem IEEE 14 bus

4.2 Sistem IEEE 30 Bus

Data yang digunakan untuk simulasi Sistem IEEE 30 bus dapat dilihat pada lampiran.

4.2.1 Pengujian Tahap 1 Sistem IEEE 30 bus

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh penggunaan *static var compensator* terhadap *load margin* atau terhadap peningkatan beban. Pengujian ini dilakukan pada perhitungan OPF pada *matpower* pada sistem IEEE 30 bus yang telah dimodifikasi. Pengujian dilakukan lima kali. Pengujian pertama tanpa SVC, kedua dengan satu SVC di bus 4, ketiga dengan dua SVC di bus 4 dan 17, keempat dengan tiga SVC di bus 4, 17 dan 19, dan pengujian terakhir dengan SVC pada bus 4, 17, 19 dan 30. Pada pengujian ini akan terlihat pengaruh SVC terhadap maksimum *load margin* pada sistem IEEE 30 bus. Hasil pengujian tahap 1 ini dituliskan pada tabel 4.6 berikut:

Tabel 4.5 Penempatan SVC di Sistem IEEE 30 bus

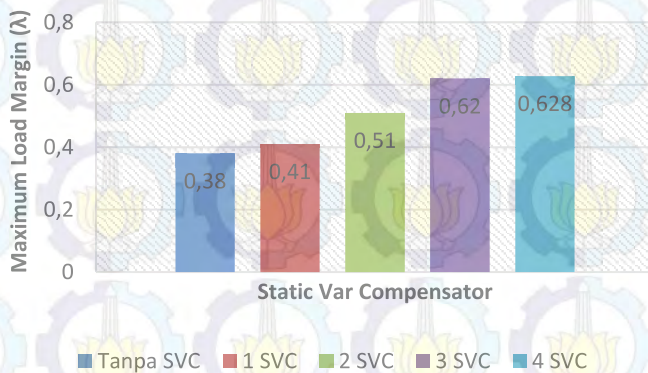
Pengujian	SVC	Bus	Kapasitas Masing2 (MVar)	Kapasitas Total (MVar)
P1	-	-	-	-
P2	1 SVC	4	25	25
P3	2 SVC	4 & 17	25	50
P4	3 SVC	4, 17 & 19	25	75
P5	4 SVC	4, 17,19 &30	25	100

Tabel 4.6 Data hasil simulasi pengujian tahap 1 Sistem IEEE 30 bus

Pengujian	P1	P2	P3	P4	P5
Dengan	-	1 SVC	2 SVC	3 SVC	4 SVC
Load Margin Maximum	0,38	0,41	0,51	0,62	0,628
Peningkatan Maksimal Beban	38%	41%	51%	62%	628%

4.2.1.1 Analisa Pengujian Tahap 1 Sistem IEEE 30 bus

Berdasarkan data hasil simulasi pengujian tahap 1 bisa terlihat bahwa semakin banyak penggunaan *static var compensator* pada suatu sistem Sistem IEEE 30 bus membuat maksimum *load margin* sistem semakin besar.



Gambar 4.4 Pengaruh SVC terhadap λ pada Sistem IEEE 30 Bus

Bisa dilihat pada Gambar 4.4 dimana saat tidak ada penambahan *static var compensator* maksimum load margin adalah 0,38. Itu berarti bahwa sistem hanya mampu menahan peningkatan beban sebesar:

$$\begin{aligned}\text{peningkatan beban (\%)} &= (\lambda) \times 100\% = (0,38) \times 100\% \\ &= 38 \% \text{ dari beban awal.}\end{aligned}$$

berarti beban maksimum yang dapat ditanggung sistem adalah 261,10 MW dan 200,24 MVar. Untuk pengujian kedua, maksimum *load margin* yaitu 0,41 atau sistem dapat menanggung peningkatan beban sebesar 41 % dari beban awal yang berarti beban maksimum yang dapat ditanggung sistem menjadi 266.77 MW dan 204.59 MVar. Pada pengujian ketiga beban maksimum yang dapat ditanggung sistem adalah 285.69 MW dan 219.10 MVar. Pengujian keempat dengan penambahan tiga SVC, beban maksimum yang dapat ditanggung sistem adalah 306.50 MW dan 235.06 MVar. Pada pengujian kelima dengan penambahan empat SVC, beban maksimum yang dapat ditanggung sistem menjadi 308.02 MW dan 236.22 MVar. Bila dilihat dari trend kenaikan load margin terhadap penambahan SVC, untuk pengujian pertama sampai ketiga kenaikan maksimum *load margin* sistem stabil yaitu sekitar 0,1 namun pada pengujian kelima dengan penambahan SVC di bus 30 yang berkapasitas sama yaitu 25 MVar. Kenaikan maksimum load margin menjadi turun drastis yaitu sekitar 0,008. Ini berarti tidak selamanya penambahan SVC pada suatu sistem tenaga listrik dapat menaikkan maksimum *load margin* sistem. Apabila kenaikan load margin sudah mencapai batas, penambahan SVC tidak lagi akan menambah load margin dari suatu sistem tenaga listrik, dalam kasus ini adalah Sistem IEEE 30 bus.

Maka bisa dilihat dari hasil simulasi pengujian tahap 1 bahwa penggunaan SVC dapat membantu sistem dalam meningkatkan maksimum *load margin* sistem, yang berarti menjauhkan sistem dari *Volatge collapse*. Sehingga sistem bisa dikatakan lebih stabil Dan juga membuat sistem dapat menanggulangi peningkatan beban yang berlebih tanpa harus menambahkan pembangkit tambahan. Namun tidak selamanya penambahan SVC dapat meningkatkan load margin sistem. Ada titik tertentu dimana penambahan SVC tidak lagi meningkatkan *load margin* (beban maksimum yang dapat ditanggung sistem).

4.2.2 Pengujian Tahap 2 Sistem IEEE 30 bus

Pengujian tahap 2 adalah pengujian pengaruh penggunaan *static var compensator* terhadap biaya optimal pembangkitan tenaga listrik pada suatu sistem tenaga listrik atau bisa dikatakan pengaruh SVC terhadap fungsi objektif dari perhitungan *OPF*.

Pengujian ini dilakukan pada sistem IEEE 30 bus yang dimodifikasi dengan *load margin* (λ) = 0,3 atau beban naik 30% dari total beban awal, menjadi sebesar 245,96 MW dan 188,63MVar. Pengujian dilakukan lima kali yaitu: Pengujian pertama tanpa SVC, kedua dengan satu SVC di bus 4, ketiga dengan dua SVC di bus 4 dan 17, keempat dengan tiga SVC di bus 4,17 dan 19, dan pengujian terakhir dengan SVC pada bus 4,17,19 dan 30. Pada pengujian ini akan terlihat pengaruh SVC terhadap biaya pembangkitan hasil perhitungan OPF pada sistem IEEE 30 bus. Hasil pengujian tahap 1 ini dituliskan pada tabel 4.8 dan 4.9 berikut:

Tabel 4.7 Penempatan SVC di Sistem IEEE 30 bus

Pengujian	SVC	Bus	Kapasitas Masing2 (MVar)	Kapasitas Total (MVar)
P1	-	-	-	-
P2	1 SVC	4	25	25
P3	2 SVC	4 & 17	25	50
P4	3 SVC	4, 17 & 19	25	75
P5	4 SVC	4, 17,19 & 30	25	100

Tabel 4.8 Data hasil pengujian tahap 2 Sistem IEEE 30 bus

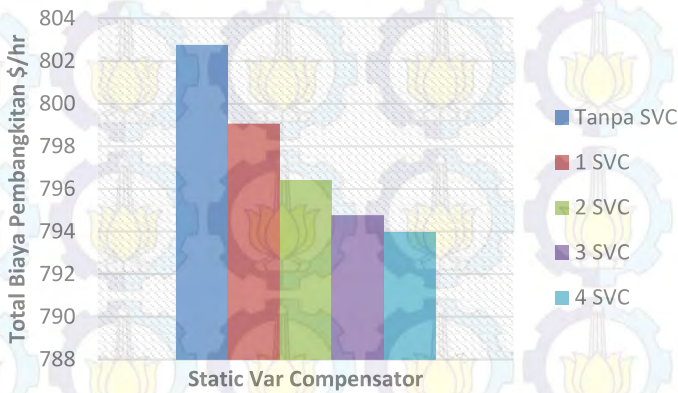
Pengujian		P1	P2	P3	P4	P5
Bus	SVC	-	1 SVC	2 SVC	3 SVC	4 SVC
1	Pg	55,75	53,7	53,03	52,91	52,88
2		73,05	69,74	68,82	68,66	68,63
4	SVC	0	0	0	0	0
13	Pg	24,77	26,26	26,59	26,51	26,48
17	SVC	0	0	0	0	0
19		0	0	0	0	0

Tabel 4.9 Data hasil pengujian tahap 2 Sistem IEEE 30 bus (Lanjutan)

Pengujian		P1	P2	P3	P4	P5
Bus	SVC	-	1 SVC	2 SVC	3 SVC	4 SVC
22	Pg	20,74	24,53	25,83	25,98	25,98
23		25,92	27,17	26,75	26,72	26,75
27		51,37	49,74	49,45	49,27	49,14
30	SVC	0	0	0	0	0
1	Qg	9,01	-1,86	-5,25	-4,15	-3,92
2		60	60	39,75	35,33	35,48
4	SVC	0	25	25	25	25
13	Qg	44,7	44,7	38,79	27,73	27,86
17	SVC	0	0	25	21,29	21,37
19		0	0	0	21,02	21,02
22	Qg	24,41	24,43	27,88	24,73	24,88
23		11,66	10,07	8,82	8,33	8,52
27		42,7	27,8	27,47	26,51	15,22
30	SVC	0	0	0	0	10
Total Pg		251,6	251,14	250,47	250,05	249,86
Total Qg		192,48	165,14	137,46	118,48	108,04
Total Loss P		5,652	5,184	4,494	4,092	3,903
Total Loss Q		20,86	18,66	16,2	14,53	14,17
Biaya (\$/hr)		802,7622	799,072	796,4017	794,757	793,97

4.2.2.1 Analisis Pengujian Tahap 2 Sistem IEEE 30 bus

Berdasarkan data pengujian tahap dua bisa dilihat bahwa penggunaan SVC dapat menurunkan biaya pembangkitan yang berarti menurunkan biaya operasi sistem tenaga listrik.

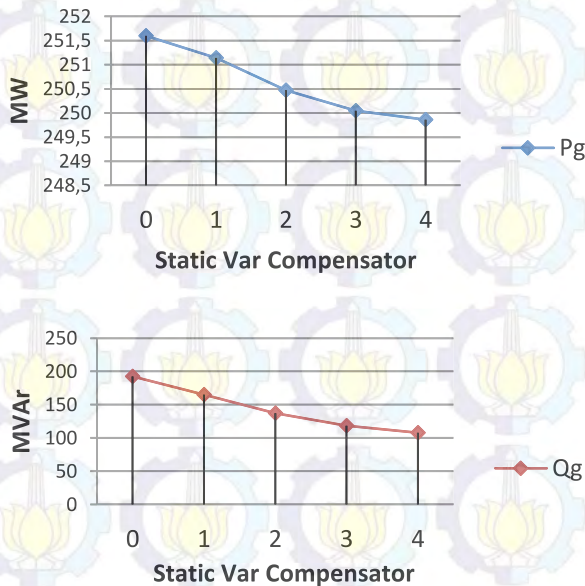


Gambar 4.5 Pengaruh SVC pada biaya pembangkitan Sistem IEEE 30 bus dengan $\lambda = 0,3$

Pada Gambar 4.5 diatas terlihat untuk sistem dengan *load margin* yang sama yaitu 0,3 atau beban total sebesar 245,96 MW dan 188,63 MVar. Bila tanpa menggunakan SVC, total biaya optimum untuk pembangkitan pada sistem IEEE 30 bus adalah 802,7622 \$/hr. Bila ditambahkan satu SVC pada sistem di bus 4 dengan kapasitas maksimum 25 MVar total biaya pembangkitan menjadi 799,072 \$/hr. Berarti dapat menghemat biaya pembangkitan sebesar:

$$\begin{aligned}
 \text{Penghematan Biaya} &= \text{Biaya tanpa SVC} - \text{biaya dengan SVC} \\
 &= 802,7622 \text{ $/hr} - 799,072 \text{ $/hr} \\
 &= 3,6903 \text{ $/hr}
 \end{aligned}$$

Bila ditambahkan dua SVC pada sistem di bus 4 dan 17 dengan kapasitas yang sama yaitu 25 MVar. Maka total biaya pembangkitan optimum sistem menjadi 796,4017 \$/hr. Yang berarti menghemat biaya pembangkitan sebesar 6,3605 \$/hr. Dan bila ditambah SVC lagi di bus 19, biaya pembangkitan menjadi 794,757 \$/hr. dan bila ditambah lagi SVC di bus 30 dengan kapasitas yang sama, biaya pembangkitan menjadi 793,970 \$/hr. Jadi bisa dilihat bahwa penggunaan *static var compensator* dapat menurunkan biaya pembangkitan pada sistem tenaga listrik.



Gambar 4.6 Pengaruh SVC pada P dan Q generator pada Sistem IEEE 30 bus

Pada pengujian tahap kedua ini, terlihat bahwa dengan penambahan SVC, jumlah injeksi daya pada generator menurun, baik daya aktif (MW) ataupun daya reaktif (MVar). Penurunan injeksi daya generator disebabkan karena penurunan loss sistem. Dikarenakan SVC adalah kompensator daya reaktif. Maka dengan pemasangan SVC loss sistem menjadi turun.

4.3 Sistem Jawabali

Data yang digunakan untuk simulasi Sistem 25 bus Jawabali dapat dilihat pada lampiran.

4.3.1 Pengujian Tahap 1 Sistem 25 Bus Jawabali

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh penggunaan *static var compensator* terhadap *load margin* atau terhadap peningkatan beban. Pengujian ini dilakukan pada perhitungan *OPF* pada matpower

pada sistem jawabali yang telah dimodifikasi. Pengujian dilakukan lima kali. Pengujian pertama tanpa SVC, kedua dengan satu SVC di bus 5, ketiga dengan dua SVC di bus 5 dan 14, keempat dengan tiga SVC di bus 5, 14 dan 20, dan pengujian terakhir dengan SVC pada bus 5, 14, 20 dan 25. Pada pengujian ini akan terlihat pengaruh SVC terhadap maksimum *load margin* pada Sistem 25 bus Jawabali. Hasil pengujian tahap 1 ini dituliskan pada tabel 4.11 berikut:

Tabel 4.10 Penempatan SVC pada sistem Jawabali

Pengujian	SVC	Bus	Kapasitas Masing2 (MVar)	Kapasitas Total (MVar)
P1	-	-	-	-
P2	1 SVC	5	150	150
P3	2 SVC	5 & 14	150	300
P4	3 SVC	5, 14 & 20	150	450
P5	4 SVC	5, 14,20 &25	150	600

Tabel 4.11 Data hasil simulasi pengujian tahap 1 Sistem Jawabali

Pengujian	P1	P2	P3	P4	P5
Dengan	-	1 SVC	2 SVC	3 SVC	4 SVC
Load Margin Max	0,45	0,47	0,48	0,49	0,5
Peningkatan Maksimal Beban	45%	47%	48%	49%	50%
Pg	14068,85	14272,6	14375,64	14473,6	14570,8
Qg	8210,43	8423,54	8540,11	8604,60	8633,99

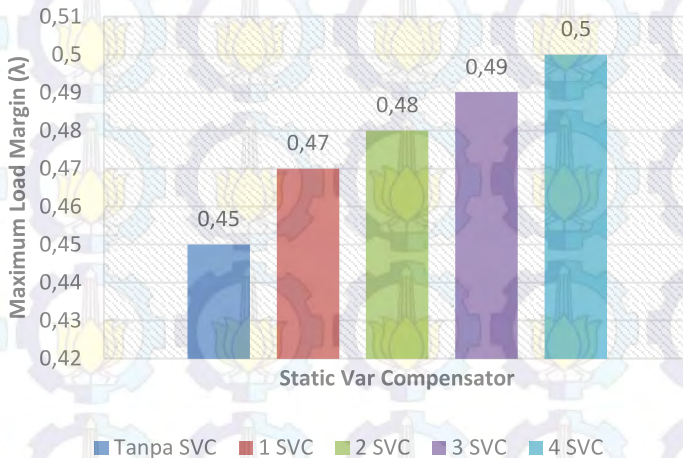
4.3.1.1 Analisa Pengujian Tahap 1 Sistem Jawabali

Berdasarkan data hasil simulasi pengujian tahap 1 bisa terlihat bahwa semakin banyak penggunaan *static var compensator* pada suatu sistem tenaga listrik membuat sistem tersebut semakin bisa menanggulangi peningkatan beban.

Bisa dilihat pada Tabel 4.11 dimana pada pengujian pertama, saat tidak ada penambahan *static var compensator* maksimum load margin

adalah 0,45. Itu berarti bahwa sistem hanya mampu menahan peningkatan beban sekitar:

$$\begin{aligned} \text{peningkatan beban (\%)} &= (\lambda) \times 100\% = (0,45) \times 100\% \\ &= 45 \% \text{ dari beban awal} \end{aligned}$$



Gambar 4.7 Pengaruh SVC terhadap *load margin* pada Sistem Jawabali

berarti beban maksimum yang dapat ditanggung sistem adalah 13764,85 MW dan 5069,20 MVar. Dan pada pengujian kedua sistem dengan penambahan satu SVC, maksimum *load margin* yaitu 0,47 berarti sistem dapat menanggung peningkatan beban sebesar 47%, berarti beban maksimum yang dapat ditanggung sistem adalah 13954,71 MW dan 5139,12 MVar. Pada pengujian ketiga dengan penambahan dua SVC maka maksimum *load margin* menjadi 0,48 atau sistem dapat menanggung peningkatan beban sebesar 48 % dari beban awal, sekitar 14049,64 MW dan 5174,08 MVar. Pada percobaan keempat menggunakan tiga SVC, maksimum *load margin* adalah 0,49 dan pada percobaan kelima menggunakan empat SVC, maksimum *load margin* adalah 0,5. Bila dilihat dari *trend* kenaikan *load margin* terhadap penambahan SVC.

Maka bisa dilihat dari hasil simulasi pengujian tahap 1 bahwa penggunaan SVC dapat membantu sistem dalam meningkatkan

maksimum *load margin* sistem. Yang berarti menjauhkan sistem dari *Volatge collapse*. Sehingga sistem bisa dikatakan lebih stabil. Dan juga membuat sistem dapat menanggulangi peningkatan beban yang berlebih tanpa harus menambahkan pembangkit tambahan. Dengan syarat selama peningkatan beban tersebut tidak melebihi maksimum *load margin*. Namun tidak selamanya penambahan Var dapat meningkatkan *load margin* (peningkatan beban). Ada saat dimana penambahan SVC tidak lagi meningkatkan *load margin*, yaitu ketika beban sudah mendekati kapasitas maksimum pembangkitan.

4.3.2 Pengujian Tahap 2 Sistem 25 Bus Jawabali

Pengujian tahap 2 ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari penggunaan *static var compensator* terhadap biaya optimal pembangkitan tenaga listrik pada suatu sistem tenaga listrik dalam hal ini adalah sistem Jawabali atau bisa dikatakan pengaruh SVC terhadap fungsi objektif dari perhitungan *OPF*.

Pengujian ini dilakukan pada sistem 25 bus Jawabali yang dimodifikasi dengan *load margin* (λ) = 0,4. Beban sebesar 13290,20 MW dan 4894,40 MVar. Pengujian dilakukan lima kali yaitu: Pengujian pertama tanpa SVC, kedua dengan satu SVC di bus 5, ketiga dengan dua SVC di bus 5 dan 14, keempat dengan tiga SVC di bus 5,14 dan 20, dan pengujian terakhir dengan SVC pada bus 5,14,20 dan 25. Pada pengujian ini akan terlihat pengaruh SVC terhadap biaya pembangkitan hasil perhitungan OPF pada Sistem 25 Bus Jawabali.. Hasil pengujian tahap 2 ini dituliskan pada tabel 4.13 dan 4.14 berikut:

Tabel 4.12 Penempatan SVC pada Sistem 25 bus Jawabali

Pengujian	SVC	Bus	Kapasitas Masing2 (MVar)	Kapasitas Total (MVar)
P1	-	-	-	-
P2	1 SVC	5	150	150
P3	2 SVC	5 & 14	150	300
P4	3 SVC	5, 14 & 20	150	450
P5	4 SVC	5, 14,20 &25	150	600

Tabel 4.13 Data hasil pengujian Sistem 25 bus Jawabali tahap 2

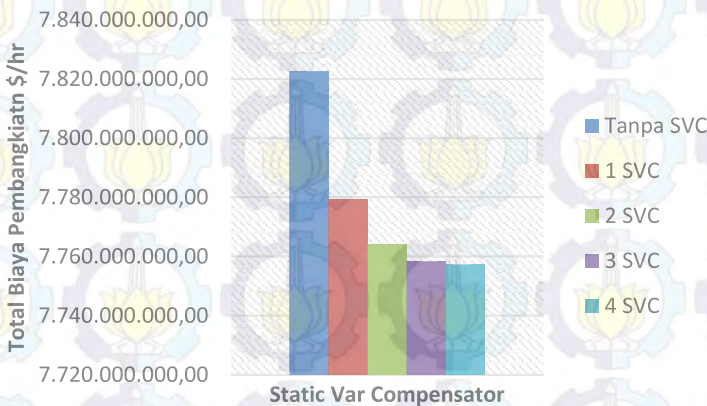
Pengujian		P1	P2	P3	P4	P5
Bus		-	1 SVC	2 SVC	3 SVC	4 SVC
Pg	1	3857	3857	3857	3857	3857
	8	1461	1369,8	1331,2	1315,8	1314,7
	10	700	700	700	700	700
	11	700	700	700	700	700
	15	1316	1316	1316	1316	1316
	17	1653,2	1697,2	1711	1715,9	1715,5
	22	3735	3735	3735	3735	3735
	23	189,2	221,1	231,5	234,9	234,7
Qg	1	2040	2040	2040	2011,7	1994,7
	8	1540	1540	1540	1540	1540
	10	488	488	488	488	488
	11	440	440	440	440	440
	15	480	480	480	480	480
	17	1250	1250	1244,7	1149,5	1026,4
	22	1673,5	1365,8	1072,3	974,5	946
	23	302	302	302	302	302
SVC	5	0	150	150	150	150
	14	0	0	150	150	150
	20	0	0	0	150	150
	25	0	0	0	0	150
Total Pg		13.611,4	13.596,1	13.581,7	13.574,6	13.572,9
Total Qg		8.213,5	7.905,8	7.607	7.385,7	7.217,1
Total loss P		321,203	305,855	291,456	284,482	282,665
Total loss Q		3.319,07	3.161,4	3.012,63	2.941,28	2.922,7

Tabel 4.14 Biaya pebangkitan Jawabali saat load margin = 0,4

SVC	λ	Biaya Pembangkitan \$/hr
0	0,4	7.822.663.383,0827
1	0,4	7.779.357.181,4008
2	0,4	7.764.149.333,5676
3	0,4	7.758.439.943,4659
4	0,4	7.757.294.693,2083

4.3.2.1 Analisis Pengujian Tahap 2 Sistem Jawabali

Berdasarkan data pengujian tahap dua bisa dilihat bahwa penggunaan SVC dapat menurunkan biaya pembangkitan yang berarti menurunkan biaya operasi sistem tenaga listrik.



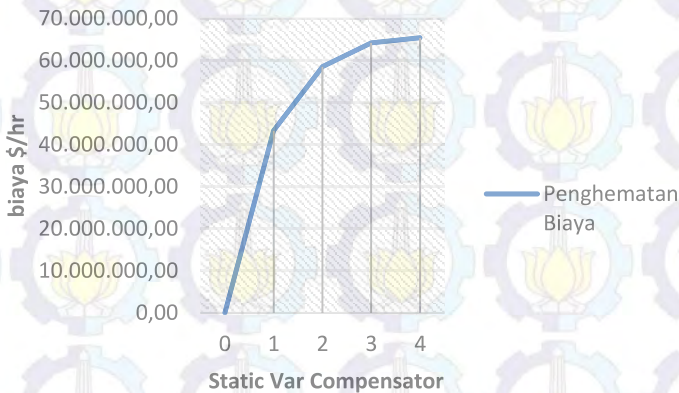
Gambar 4.8 Pengaruh SVC terhadap biaya pembangkitan Pada sistem Jawabali

Pada Gambar 4.8 diatas terlihat untuk sistem dengan *load margin* yang sama yaitu 0,4 atau beban sebesar 140% dari beban awal. Bila tanpa menggunakan SVC, total biaya optimum untuk pembangkitan pada Sistem Jawabali adalah 7.822.663.383,0827 \$/hr. Bila ditambahkan satu SVC pada sistem di bus 5 dengan kapasitas maksimum

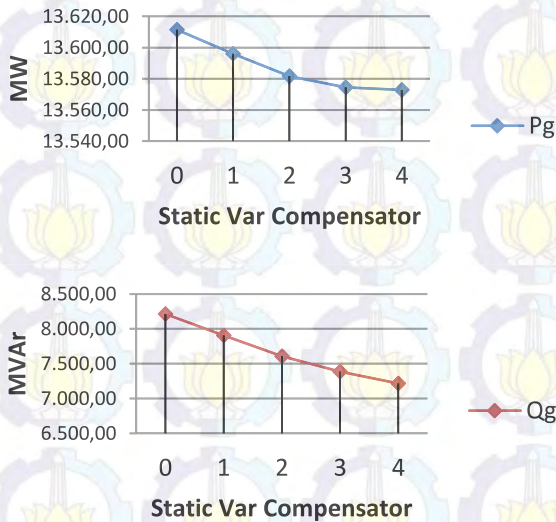
25 Mvar total biaya pembangkitan menjadi 7.779.357.181,4008 \$/hr. Berarti dapat menghemat biaya pembangkitan sebesar:

$$\begin{aligned} \text{Penghematan Biaya} &= \text{Biaya tanpa SVC} - \text{biaya dengan SVC} \\ &= 7.822.663.383 \text{ \$/hr} - 7.779.357.181 \text{ \$/hr} \\ &= 43.306.202 \text{ \$/hr} \end{aligned}$$

Bila ditambahkan dua SVC pada sistem di bus 5 dan 14 dengan kapasitas yang sama yaitu 150 MVar. Maka total biaya pembangkitan optimum sistem menjadi 7.764.149.333,5676 \$/hr. Yang berarti menghemat biaya pembangkitan sebesar 58.514.050 \$/hr. Dan bila ditambah satu SVC lagi di bus 20 menghemat biaya pembangkitan sebesar 64.22.440 \$/hr. dan bila ditambah lagi SVC di bus 25 menjadi 4 SVC dengan kapasitas yang sama menghemat biaya pembangkitan sebesar 65.368.690 \$/hr. Jadi bisa dilihat bahwa penggunaan *static var compensator* dapat menurunkan biaya pembangkitan pada sistem tenaga listrik.



Gambar 4.9 Pengaruh SVC terhadap penghematan biaya pembangkitan



Gambar 4.10 Pengaruh SVC terhadap P dan Q generator pada Sistem Jawabali

Pada pengujian tahap kedua ini, terlihat bahwa dengan penambahan SVC, jumlah injeksi daya pada generator menurun, baik daya aktif (MW) ataupun daya reaktif (MVar). Penurunan daya reaktif generator lebih besar bila dibandingkan dengan daya aktif. Dikarenakan SVC sendiri adalah penghasil daya reaktif.

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi dan analisis diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Dengan pemasangan *static var compensator* pada Sistem IEEE 14 bus *load margin* sistem meningkat dari 0,9 menjadi 1,09. Untuk Sistem IEEE 30 bus dari 0,38 menjadi 0,628. Dan Sistem Jawabali dengan 25 bus dari 0,45 menjadi 0,5. Itu dikarenakan dengan penambahan var maka power faktor sistem menjadi lebih baik. sehingga sistem menjadi lebih efisien. Dengan bertambahnya maximum *load margin* sistem menunjukkan bahwa kestabilan sistem meningkat karena sistem menjauh dari *voltage collapse*.
2. Pemasangan satu *static var compensator* pada Sistem IEEE 14 bus dengan beban sebesar 466.2 MW dan 132.3 MVar dapat menghemat biaya pembangkitan dari sebesar 14,8251 \$/hr. Untuk Sistem IEEE 30 bus dengan beban sebesar 245,96 MW dan 188,63 MVar dapat menghemat biaya pembangkitan sebesar 3,6903 \$/hr. Dan untuk Sistem Jawabali dengan beban sebesar 13.290,20 MW dan 4.894,40 MVar dapat menghemat biaya sebesar 43.306.202 \$/hr.
3. Biaya pembangkitan menurun dikarenakan SVC menghasilkan daya reaktif tambahan untuk membantu memenuhi kebutuhan daya reaktif beban, dan juga dikarenakan kompensator var yang memperbaiki power faktor sistem sehingga sistem lebih efisien dan juga.
4. Dengan penambahan SVC pada sistem dengan beban tetap membuat total losses sistem menurun.

5.2 Saran

Adapun saran-saran yang dapat diberikan untuk penelitian berikutnya dengan topik yang berkaitan dengan tugas akhir ini antara lain:

1. Untuk penelitian selanjutnya dapat dikembangkan untuk mengoptimalkan pemasangan SVC pada sistem tenaga listrik baik letak maupun kapasitas dari SVC dengan metode tertentu. Agar

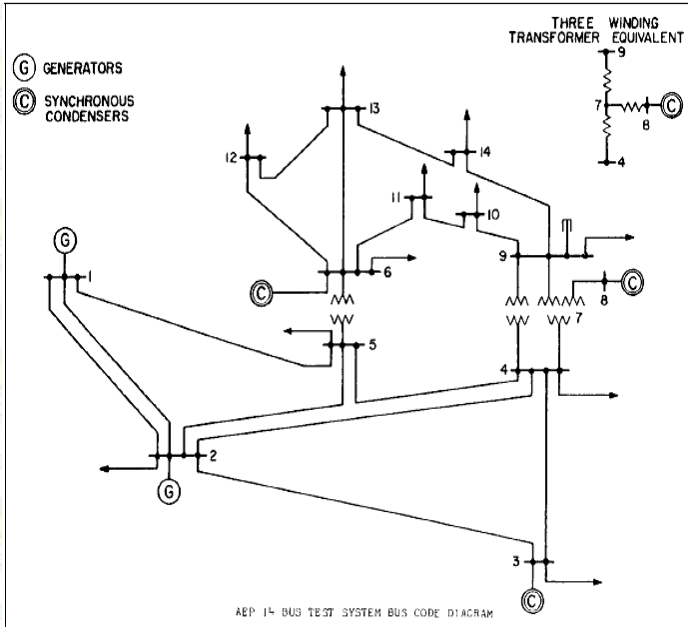
SVC dapat lebih dimanfaatkan secara maksimal pada sistem tenaga listrik.

2. Agar lebih mengetahui manfaat dari pemasangan SVC pada sistem yang nyata bisa dilakukan perhitungan dengan *Dynamic optimal power flow* pada real sistem yang ada di daerah anda.

LAMPIRAN

1 Data Sistem IEEE 14 bus

1.1 Gambar Single Line Diagram Standar IEEE 14 bus



1.2 Data cost function sistem IEEE 14 bus

Unit	Bus	Cost function	Daya Aktif		Daya Reaktif	
		(R/MWh)	MW	MW	MVar	MVar
1	1	$0.0430293P_1^2 + 20P_1$	80	0	10	0
2	2	$0.25P_2^2 + 20P_1$	80	0	50	-40
3	13	$0.01P_3^2 + 40P_1$	40	0	40	0
4	22	$0.01P_4^2 + 40P_1$	50	0	24	-6
5	23	$0.01P_5^2 + 40P_1$	30	0	24	-6

1.3 Data beban awal Sistem IEEE 14 bus

BUS	Tipe	Load	
		MW	Mvar
1	3	0	0
2	2	21,7	12,7
3	2	94,2	19
4	1	47,8	-3,9
5	1	7,6	1,6
6	2	11,2	7,5
7	1	0	0
8	2	0	0
9	1	29,5	16,6
10	1	9	5,8
11	1	3,5	1,8
12	1	6,1	1,6
13	1	13,5	5,8
14	1	14,9	5

1.4 Data Saluran Sistem IEEE 14 bus

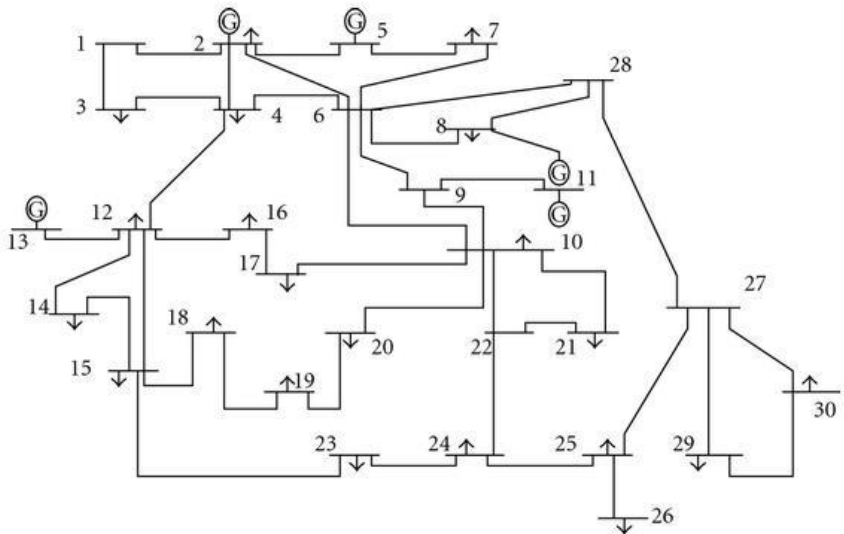
From Bus	To Bus	Resistansi	Reaktansi	Line Charging	Rate (MVA)
1	2	0,01938	0,05917	0,0528	9900
1	5	0,05403	0,22304	0,0492	9900
2	3	0,04699	0,19797	0,0438	9900
2	4	0,05811	0,17632	0,034	9900
2	5	0,05695	0,17388	0,0346	9900
3	4	0,06701	0,17103	0,0128	9900
4	5	0,01335	0,04211	0	9900
4	7	0	0,20912	0	9900

1.5 Data Saluran Sistem IEEE 14 bus (Lanjutan)

From Bus	To Bus	Resistansi	Reaktansi	Line Charging	Rate (MVA)
4	9	0	0,55618	0	9900
5	6	0	0,25202	0	9900
6	11	0,09498	0,1989	0	9900
6	12	0,12291	0,25581	0	9900
6	13	0,06615	0,13027	0	9900
7	8	0	0,17615	0	9900
7	9	0	0,11001	0	9900
9	10	0,03181	0,0845	0	9900
9	14	0,12711	0,27038	0	9900
10	11	0,08205	0,19207	0	9900
12	13	0,22092	0,19988	0	9900
13	14	0,17093	0,34802	0	9900

2 Data Sistem IEEE 30 bus

2.1 Single Line Diagram Standar IEEE 30 bus



2.2 Data cost function sistem IEEE 30 bus

Unit	Bus	Cost function	Daya Aktif		Daya Reaktif	
		(R/MWh)	MW	MW	MVAr	MVAr
1	1	$0.02P_1^2 + 2P_1$	80	0	150	-20
2	2	$0.0175 + 1.75P_1$	80	0	60	-20
3	13	$0.0625P_1^2 + P_1$	40	0	44,7	-15
4	22	$0.00834P_1^2 + 3.25P_1$	50	0	62,5	-15
5	23	$0.025P_1^2 + 3P_1$	30	0	40	-10
6	27	$0.025P_1^2 + 3P_1$	55	0	48,7	-15

2.3 Data beban awal Sistem IEEE 30 bus

BUS	Tipe	Load	
		MW	Mvar
1	3	0	0
2	2	21,7	20
3	1	2,4	2
4	2	7,6	6,6
5	1	0	0
6	1	0	0
7	2	22,8	10,9
8	1	30	30
9	1	0	0
10	1	5,8	5
11	1	0	0
12	1	11,2	8
13	2	0	0
14	1	6,2	2,6
15	1	8,2	3,5
16	1	3,5	1,8
17	2	9	8,8
18	1	3,2	2,9
19	2	9,5	9,4
20	1	2,2	2
21	1	17,5	11,2
22	2	0	0
23	2	3,2	2,6
24	1	8,7	6,7
25	1	0	0
26	1	3,5	3,3

2.4 Data beban awal Sistem IEEE 30 bus (Lanjutan)

BUS	Tipe	Load	
		MW	Mvar
27	2	0	0
28	1	0	0
29	1	2,4	0,9
30	2	10,6	6,9
Total Beban		189.2	145.1

2.5 Data saluran sistem IEEE 30 bus

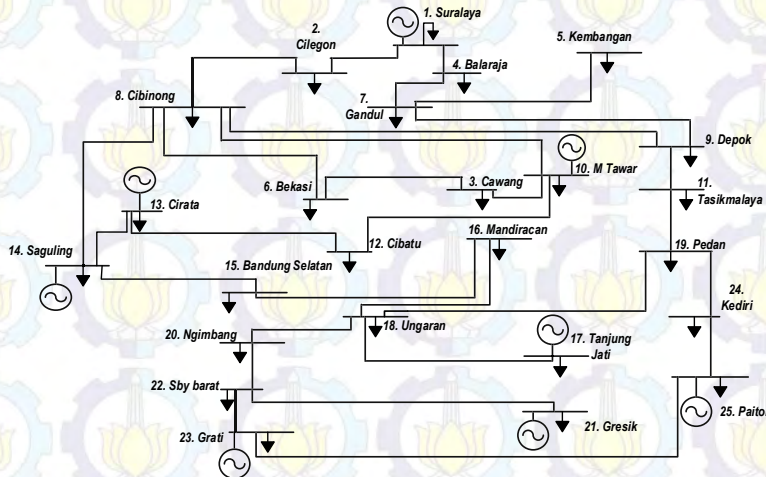
From Bus	To Bus	Resistansi	Reaktansi	Line Charging	Rate (MVA)
1	2	0,02	0,06	0,03	130
1	3	0,05	0,19	0,02	130
2	4	0,06	0,17	0,02	65
3	4	0,01	0,04	0	130
2	5	0,05	0,2	0,02	130
2	6	0,06	0,18	0,02	65
4	6	0,01	0,04	0	90
5	7	0,05	0,12	0,01	70
6	7	0,03	0,08	0,01	130
6	8	0,01	0,04	0	60
6	9	0	0,21	0	65
6	10	0	0,56	0	32
9	11	0	0,21	0	65
9	10	0	0,11	0	65
4	12	0	0,26	0	65
12	13	0	0,14	0	65
12	14	0,12	0,26	0	32

2.6 Data saluran sistem IEEE 30 bus (Lanjutan)

From Bus	To Bus	Resistansi	Reaktansi	Line Charging	Rate (MVA)
12	15	0,07	0,13	0	32
12	16	0,09	0,2	0	32
14	15	0,22	0,2	0	16
15	18	0,11	0,22	0	16
18	19	0,06	0,13	0	32
19	20	0,03	0,07	0	40
10	20	0,09	0,21	0	32
10	17	0,03	0,08	0	32
10	21	0,03	0,07	0	32
10	22	0,07	0,15	0	32
21	22	0,01	0,02	0	32
15	23	0,1	0,2	0	16
22	24	0,12	0,18	0	16
23	24	0,13	0,27	0	16
24	25	0,19	0,33	0	30
25	26	0,25	0,38	0	30
25	27	0,11	0,21	0	30
28	27	0	0,4	0	65
27	29	0,22	0,42	0	16
27	30	0,32	0,6	0	16
29	30	0,24	0,45	0	16
8	28	0,06	0,2	0,02	45
6	28	0,02	0,06	0,01	32

3 Data sistem 25 bus Jawabali

3.1 Single Line Diagram Standar Sistem 25 bus Jawabali



3.2 Data cost function Sistem 25 bus Jawabali

Unit	Bus	Cost function (R/MWh)	Daya Reaktif		Daya Aktif	
			MVAR	MVAR	MW	MW
1	1	$11.753114P_1^2$ $+ 306611.6228P_1$ $+ 211168540.9$	2040	-600	3857	0
2	8	$952.80199P_2^2$ $- 1841004.908P_2$ $+ 2703884818$	1540	-700	2016	0
3	10	0	488	-488	700	0
4	11	0	440	-140	700	0
5	15	$16.9681675P_5^2$ $+ 285201.1629P_5$ $+ 53525983.02$	480	-240	1316	0
6	17	$1374.59867P_6^2$ $- 4142734.968P_6$ $+ 5132099367$	1250	-610	2587	0

3.3 Data cost function Sistem 25 bus Jawabali (Lanjutan)

Unit	Bus	<i>Cost function</i> (R/MWh)	Daya Reaktif MVar		Daya Aktif MW	
			MVar	MVar	MW	MW
7	22	$55.847182P_7^2$ $- 52533.46725P_7$ $+ 432168961.7$	1920	-840	3735	0
8	23	$1979.263861P_8^2$ $- 358778.5066P_8$ $+ 689633384.9$	302	-302	850	0

3.4 Data beban awal Sistem 25 bus Jawabali

BUS	Tipe	Load	
		MW	Mvar
1	3	220	69
2	1	186	243
3	1	254	36
4	1	447	46
5	1	680	358
6	1	566	164
7	1	621	169
8	2	0	0
9	1	994	379
10	2	550	177
11	2	0	0
12	1	666	400
13	1	293	27
14	1	494	200
15	2	0	0
16	1	440	379
17	2	123	-91

3.5 Data beban awal Sistem 25 bus Jawabali (Lanjutan)

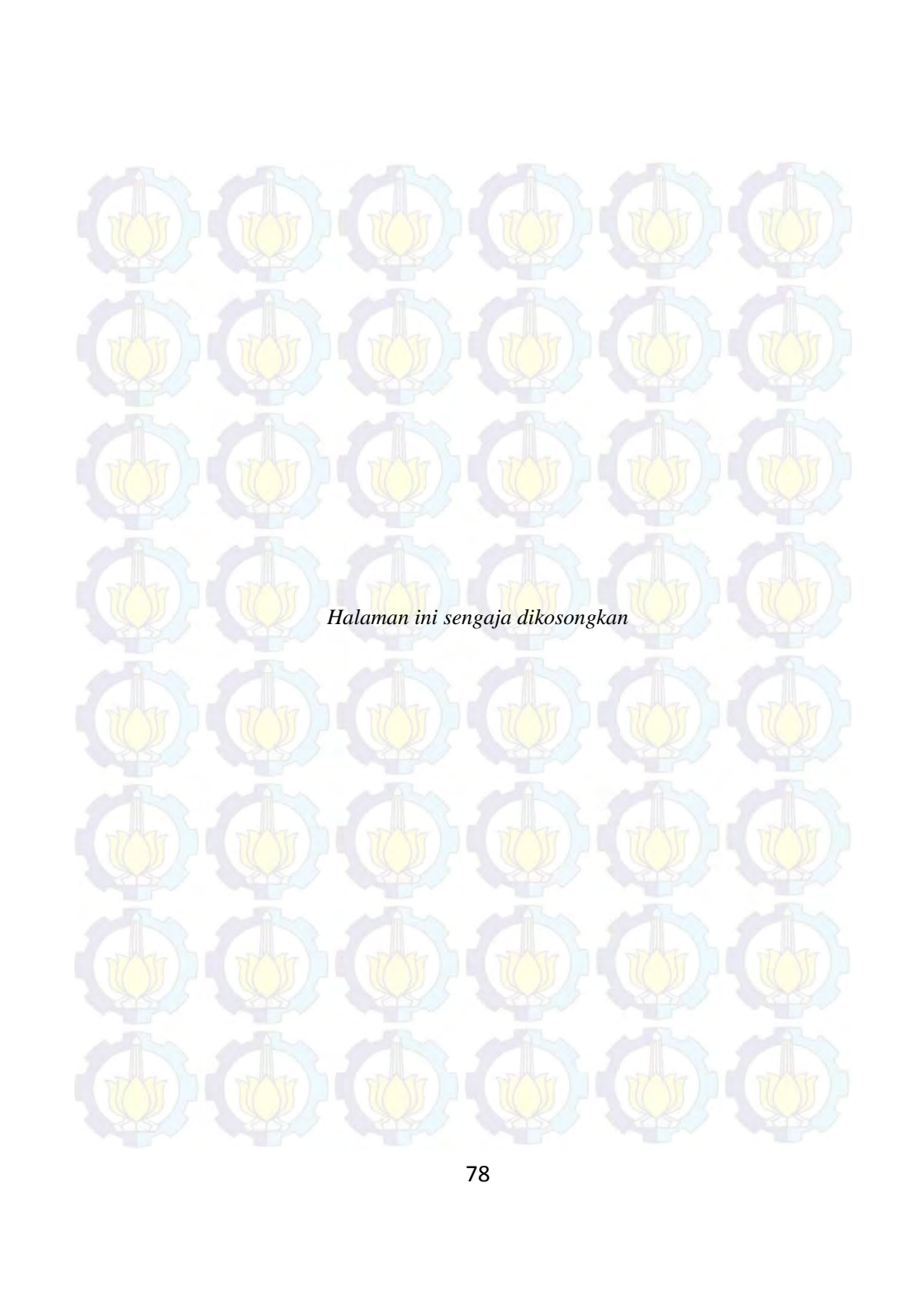
BUS	Tipe	Load	
		MW	Mvar
18	1	327	67
19	1	213	73
20	1	530	180
21	1	551	153
22	2	267	50
23	2	111	132
24	1	681	226
25	1	279	59
Total Load		9493	3496

3.6 Data saluran sistem Jawabali

F- Bus	T- Bus	Resistansi	Reaktansi	Line Charging	Rate (MVA)
1	2	0,00062649	0,00700876	0	4800
1	24	0,00367767	0,03533331	0	3960
2	5	0,01313332	0,14692579	0	2400
3	4	0,00151317	0,01692830	0	4800
4	18	0,00069417	0,00666929	0	4800
5	7	0,00444188	0,0426754	0	1980
5	8	0,0062116	0,059678	0	1980
5	11	0,00411138	0,04599504	0	4800
6	8	0,0056256	0,054048	0	1980
8	9	0,00282205	0,02711295	0	3960
9	10	0,00273996	0,02632419	0	3960
10	11	0,00147472	0,01416845	0	3960
11	12	0,0019578	0,0219024	0	4800

3.7 Data saluran sistem Jawabali (Lanjutan)

F- Bus	T- Bus	Resistansi	Reaktansi	Line Charging	Rate (MVA)
12	13	0,00699098	0,0671659	0	3960
13	14	0,013478	0,12949	0	3960
14	15	0,01353392	0,15140736	0	4800
14	16	0,01579856	0,1517848	0	1980
14	20	0,00903612	0,0868146	0	2400
16	17	0,00139468	0,0133994	0	3960
16	23	0,003986382	0,044596656	0	4800
18	5	0,000818994	0,007868488	0	4800
18	19	0,014056	0,157248	0	4800
19	20	0,015311	0,171288	0	4800
20	21	0,010291	0,115128	0	4800
21	22	0,010291	0,115128	0	4800
24	4	0,002979224	0,02862292	0	3960
25	14	0,023479613	0,225580588	0	1980
25	16	0,005966652	0,057324466	0	1980



Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Robandi, Imam. “*Modern Power System Control*”, Penerbit ANDI. Yogyakarta, Bab 1, 2009.
- [2] Greene, S., Dobson, I., Alfarado, L. F.,” Sensitivity of The Loading Margin To Voltage Collapse With Respect To Arbitrary Parameters “, IEEE Transaction on Power Systems Vol.12, No.1, February 1997.
- [3] Momoh, James A, “*Electric Power System Application of Optimization*”, CRC Press, 2008.
- [4] K.R. Padiyar: “*Power System Dynamics: Stability and Control*”, 2nd edition, BS Publications, 2002.
- [5] C. Sharma dan M. G. Ganes, "Determination of the Applicability of using Modal Analysis for the Prediction of Voltage Stability," in Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008.
- [6] Prabha Kundur, “*Power System Stability and Control*”. New York, USA: McGraw-Hill, 1994.
- [7] Dr. M. Al- Salamah, “Succesive Quadratic Programming Method for Constrained Problems”, Industrial Engineering KFUPM.
- [8] Ray D, Zimmerman Carlos E. Murillo-S_anchez, “Matpower 3.2 User's Manual”, February 7, 2011.
- [9] A. J. Conejo, F. Milano, and R. Garcia-Bertrand, “Congestion Management Ensuring Voltage Stability,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 21, no. 1, pp. 357–364, Feb. 2006.
- [10] Hingorani, N. G. & Gyugyi, L. “Understanding FACTS Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems”. IEEE. ISBN 0-7803-3455-8.
- [11] Shahidehpour M, Yatim H, Zuyi Li, “Market Operations in Electric Power Systems”, New York: John Wiley & Sons Inc, 2002.
- [12] R. S. Wibowo, N. Yorino, M. Eghbal, Y. Zoka, and Y. Sasaki, “FACTS Devices Allocation With Control Coordination Considering Congestion Relief and Voltage Stability” IEEE Trans. Power Svst., vol. 26, no. 4, November 2011.
- [13] Andi M. N., Arfita Y. D., "Studi Analisa Kestabilan Tegangan Sistem 150 kV Berdasarkan Perubahan Tegangan" Jurnal Teknik Elektro ITP, Volume 2, No. 1; Januari 2013.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIOGRAFI



Penulis memiliki nama lengkap M. Sulaiman. Lahir di Pasuruan pada tanggal 13 Januari 1993. Penulis mulai menempuh jalur pendidikan formal di TK Bajangan pada tahun 1997-1999. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan dasar di SD Negeri Bajangan hingga tahun 2005. Setelah lulus dari jenjang pendidikan dasar dengan predikat peraih DANEM tertinggi di SD Bajangan, penulis melanjutkan pendidikan menengah di SMPN 1 Gondang Weatan. Pada tahun 2008, penulis memilih untuk melanjutkan pendidikan menengah atas di SMAN 1 Pasuruan. Penulis akhirnya dapat melanjutkan pendidikan di tingkat perguruan tinggi melalui jalur SNMPTN Tulis di Jurusan Teknik Elektro ITS pada tahun 2011.

Email :
Sulaimanm99@gmail.com